

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CAUDALES DE UNA  
CUENCA DE PÁRAMO. PRIMERA APROXIMACIÓN”

desde 1867

Tesis previa a la obtención  
del título de Ingeniero Civil

Autor:

Juan Fernando Farfán Durán.

Director:

Ing. Diego Esteban Mora Serrano, PhD.

Cuenca - Ecuador

2016

---

## Resumen

---

El páramo es una fuente importante de recursos hídricos para muchas ciudades del Ecuador y la región Andina. Este ecosistema podría estar amenazado por el cambio climático producto de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. El presente estudio analizó el impacto que este tendría en los caudales de la cuenca Huagrahuma, ubicada al noroeste de la ciudad de Cuenca a 4120 m.s.n.m y perteneciente a la cabecera de la subcuenca del río Machángara. La base de datos obtenida de estaciones ubicadas en la misma, consta de series observadas de precipitación, caudal y evapotranspiración en el periodo 01/09/2010 y 30/12/2011 . Se usó el modelo conceptual VHM (Veralgemeend conceptueel Hydrologisch Model por sus siglas en Holandés) para realizar una modelización de caudales con series futuras de precipitación y evapotranspiración en tres escenarios de cambio climático de alto, medio y bajo impacto. Los resultados indican que los caudales máximos a la salida de la cuenca podrían variar proporcionalmente a las emisiones. Es decir, mientras más emisiones , mayores fueron los caudales pico modelados. Contrariamente, los caudales mínimos presentaron una relación inversamente proporcional con las emisiones de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, los periodos de sequía observados fueron menos frecuentes pero más duraderos que los futuros. Lo que indicaría que los niveles de saturación no están siendo alcanzados. Esta variación fue mayor en el caso de más emisiones. El estudio pretende ayudar a entender la incidencia y magnitud del cambio climático en ecosistemas alto Andinos.

**Palabras clave:** Hidrología, Hidrometeorología, Cuenca Huagrahuma, Ecuador

Juan F. Farfán D.

---

## Abstract

---

The páramo is a very important source of water resources for many cities of Ecuador and the Andean region. This ecosystem may be threatened by climate change produced by CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. The present study analyzed the potential impact of climate change for the flows of Huagrahuma catchment. This catchment is located in the northwest part of the city of Cuenca, with height of 4120 m.a.s.l and belongs to the headwaters of the basin of the Machángara river. Observed data series of rainfall, flow and evapotranspiration during the period 01/09/2010 - 30/12/2011 is obtained from stations located along the catchment. This study used the VHM conceptual rainfall-runoff model (Veralgemeend conceptueel Hydrologisch Model for its acronym in Dutch) for the flow modeling with future rainfall and evapotranspiration series with three future climate scenarios representing high, medium and low impact. The survey results indicate that high flow vary in a proportional way to the emissions. This means that the more CO<sub>2</sub> emissions the higher peak flows is modeled. By contrast, low peak flows showed an inversely proportional relationship to the emissions. Additionally, it was found that periods of drought for the observed series occurred in a higher frequently way but with lower durations than in the future modeled scenarios. This indicates that levels of saturation are not getting reached. This variation was major in the case of more emissions. The results of this study supports the understanding of magnitudes and incidences of climate changes in High Andean ecosystems.

**Keywords:** Hydrology, Hydrometeorology, Huagrahuma catchment, Ecuador

Juan F. Farfán D.

---

# Índice general

---

Resumen . . . . .	2
Abstract . . . . .	3
Índice general . . . . .	4
Índice de figuras. . . . .	7
Índice de tablas. . . . .	9
 <b>1. Introducción</b>	 <b>16</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	16
1.1.1. El ecosistema de páramo . . . . .	16
1.1.2. Cambio climático . . . . .	17
1.2. Cambio climático en Ecuador . . . . .	18
1.3. Escenarios de emisiones y modelos climáticos . . . . .	19
1.3.1. Escenarios de emisiones . . . . .	20
1.3.2. Modelos climáticos . . . . .	22
1.4. Modelación hidrológica y estudios realizados en el Ecuador . . . . .	23
1.4.1. Modelación hidrológica . . . . .	23
1.4.2. Estudios realizados en el Ecuador . . . . .	24
1.5. Justificación . . . . .	25
1.6. Objetivos . . . . .	26
1.6.1. Objetivo general . . . . .	26
1.6.2. Objetivos específicos . . . . .	27
 <b>2. Materiales</b>	 <b>28</b>
2.1. Descripción de la zona de estudio . . . . .	28
2.2. Descripción de la base de datos disponible . . . . .	29
2.2.1. Datos de precipitación . . . . .	29
2.2.2. Datos de caudal . . . . .	29

2.2.3.	Datos de evapotranspiración . . . . .	30
2.2.4.	Escenarios de cambio climático . . . . .	30
2.3.	WETSPRO: Water Engineering Time Series PRO- cessing tool . . . . .	30
2.4.	Descripción del modelo hidrológico VHM . . . . .	31
2.4.1.	Transformaciones de Box-Cox . . . . .	32
2.4.2.	Estructura del modelo conceptual VHM . . . . .	33
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>36</b>
3.1.	Datos de precipitación . . . . .	36
3.1.1.	Determinación de una serie única de precipi- tación . . . . .	36
3.2.	Datos de caudal . . . . .	37
3.3.	Serie de evapotranspiración . . . . .	38
3.4.	Separación de flujos en WETSPRO . . . . .	41
3.5.	Calibración del modelo VHM . . . . .	42
3.5.1.	Ingreso de datos para la modelización . . . . .	42
3.5.2.	Calibración del modelo de almacenamiento . . . . .	42
3.5.3.	Calibración del modelo de flujo superficial . . . . .	43
3.5.4.	Calibración del modelo de interflujo . . . . .	43
3.5.5.	Enrutamiento de los flujos . . . . .	43
3.6.	Validación del modelo VHM . . . . .	43
3.7.	Evaluación de eficiencia . . . . .	44
3.7.1.	Método del error medio cuadrático . . . . .	44
3.7.2.	Método de Nash-Sutcliffe . . . . .	44
3.8.	Series de datos futuras . . . . .	45
<b>4.</b>	<b>Metodología de Análisis</b>	<b>47</b>
4.1.	Comparación de caudales observados con los modelados . . . . .	47
4.2.	Análisis de los periodos de sequía . . . . .	48
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
5.1.	Calibración del modelo VHM . . . . .	49
5.1.1.	Calibración del modelo de almacenamiento . . . . .	49
5.1.2.	Calibración del modelo de flujo superficial . . . . .	49
5.1.3.	Calibración del modelo de interflujo . . . . .	50
5.2.	Eficiencia mediante el error cuadrático medio . . . . .	50



5.3.	Eficiencia con el método de Nash-Sutcliffe . . . . .	51
5.4.	Análisis de variación de caudales en escenarios futuros	52
5.4.1.	Variación con respecto al escenario B1 . . . . .	54
5.4.2.	Variación con respecto al escenario A1B . . . . .	55
5.4.3.	Variación con respecto al escenario A2 . . . . .	56
5.4.4.	Comparación de las variaciones en los 3 escenarios con respecto al periodo actual . . . . .	58
5.5.	Análisis de sequías . . . . .	59
5.5.1.	Sequías en el escenario A2 . . . . .	60
5.5.2.	Sequías en el escenario A1B . . . . .	61
5.5.3.	Sequías en el escenario B1 . . . . .	62
5.5.4.	Comparación de las sequías en los 3 escenarios	63
<b>6.</b>	<b>Conclusiones, observaciones y recomendaciones</b>	<b>64</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	64
6.2.	Observaciones . . . . .	66
6.3.	Recomendaciones . . . . .	67
<b>Anexos</b>		<b>68</b>
6.4.	WETSPRO: Water Engineering Time Series Processing tool . . . . .	68
6.4.1.	Modelo del reservorio lineal . . . . .	69
<b>Bibliografía.</b>		<b>83</b>

---

## Índice de figuras.

---

1.1.	Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE Fuente: Informe Especial: Escenarios de Emisiones . . . .	21
2.1.	Mapa de la Microcuenca Huagrahuma . . . . .	28
2.2.	Vertedero Triangular a la salida de la microcuenca Huagrahuma . . . . .	29
2.3.	Esquema del funcionamiento del modelo VHM. . . .	32
3.1.	Evapotranspiración potencial para un día del mes de enero . . . . .	41
5.1.	Diagramas de caja para el periodo observado y los escenarios A2, A1B y B1 . . . . .	53
5.2.	Diagramas de caja para los datos observados y el escenario B1 . . . . .	54
5.3.	Diagramas de caja para el periodo observado y el escenario A1B . . . . .	55
5.4.	Diagrama de caja para el periodo observado y el escenario A2 . . . . .	57
6.1.	Serie de entrada y salida de un modelo de reservorio lineal . . . . .	69
6.2.	Recesión exponencial de las salidas del reservorio lineal durante periodos con cero flujo de entrada . . .	70
6.3.	Diagramas de caja para los modelos climáticos del escenario A2 . . . . .	74
6.4.	Diagramas de caja para los modelos climáticos del escenario A1B . . . . .	77



6.5. Diagramas de caja para los modelos climáticos del escenario B1 . . . . .	80
6.6. Caudal y precipitación actual vs caudal y precipita- ción del modelo . . . . .	82





---

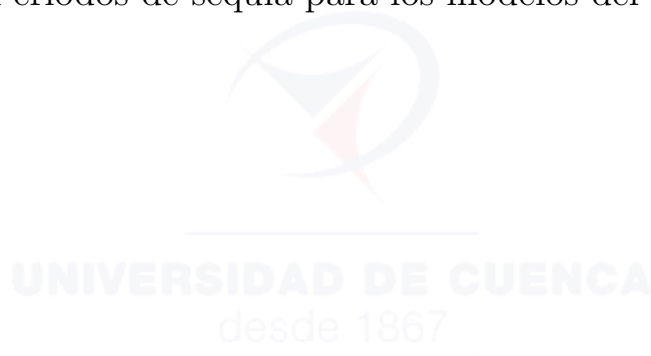
## Índice de tablas.

---

3.1. Número máximo de horas de sol diarias para cada mes del año . . . . .	40
3.2. Evapotranspiración mensual . . . . .	40
5.1. Parámetros de calibración del modelo de almacenamiento . . . . .	49
5.2. Parámetros de calibración para el flujo superficial . . . . .	50
5.3. Parámetros de calibración para el Interflujo . . . . .	50
5.4. Eficiencia de MSE en la calibración . . . . .	51
5.5. Eficiencia de MSE en la validación . . . . .	51
5.6. Eficiencia de Nash-Sutcliffe en la calibración . . . . .	51
5.7. Eficiencia de Nash-Sutcliffe en la validación . . . . .	52
5.8. Resultados generales obtenidos . . . . .	53
5.9. Variaciones en el escenario B1 . . . . .	54
5.10. Variación en el escenario A1B . . . . .	55
5.11. Variación en el escenario A2 . . . . .	56
5.12. Comparación de variaciones en los 3 escenarios . . . . .	58
5.13. Sequías en el escenario A2 . . . . .	60
5.14. Comparación de sequías entre periodo observado y escenario A2 . . . . .	60
5.15. Sequías en el escenario A1B . . . . .	61
5.16. Periodos de sequía en el periodo observado y escenario A1B . . . . .	61
5.17. Sequías en el escenario B1 . . . . .	62
5.18. Comparación de sequías entre periodo observado y escenario B1 . . . . .	62
5.19. Sequías en los escenarios A2, A1B, B1 y en el periodo observado . . . . .	63




6.1. Escenarios y modelos globales usados en la modelización . . . . .	72
6.2. Parámetros estadísticos para cada modelo climático del escenario A2 . . . . .	73
6.3. Periodos de sequía para los modelos del escenario A2	75
6.4. Parámetros estadísticos para cada modelo climático del escenario A1B . . . . .	76
6.5. Periodos de sequía para los modelos del escenario A1B	78
6.6. Parámetros estadísticos para cada modelo climático del escenario B1 . . . . .	79
6.7. Periodos de sequía para los modelos del escenario B1	81





Yo, *Juan Fernando Farfán Durán*, autor de la tesis *Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de páramo. Primera aproximación*, certifico que todas las ideas, opiniones, y contenidos expuestos en la presente investigación, son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Abril 2016.



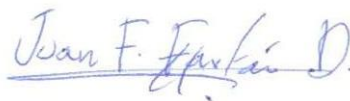
---

Juan Fernando Farfán Durán  
C.I. 0103937041



Yo, *Juan Fernando Farfán Durán*, autor de la tesis *Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de páramo. Primera aproximación*, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de *Ingeniero Civil*. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Abril 2016.



---

Juan Fernando Farfán Durán  
C.I. 0103937041

---

## Agradecimientos

---

A mi director de tesis, Ing. Diego Mora PhD, por su magnífica dirección y quien con su inagotable conocimiento ha sabido guiar y motivar el desarrollo del presente proyecto de la mejor manera.

Al Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS) que brindó la base de datos necesaria para este estudio.

A los profesores de la facultad y todos mis amigos que han sido parte de mi desarrollo académico, en especial a Jacinto, Oscar y Rashid.

---

## Dedicatoria

---

A mi padre, a mi madre, hermanas y sobrino.

Juan F. Farfán D.



## Capítulo 1

---

# Introducción

---

El cambio climático constituye un fenómeno de alcance global que puede tener grandes repercusiones en distintos ecosistemas, sus efectos colaterales podrían afectar a la disponibilidad de agua para abastecer a la población mundial que se encuentra en constante crecimiento. Por otra parte, el páramo es un ecosistema que representa una fuente de agua muy importante en nuestra región. Es por esto que analizar el impacto que este fenómeno pueda tener sobre estos ecosistemas es de gran importancia. Se va a abordar su estudio probando diferentes escenarios futuros que permitan encontrar comportamientos similares que se puedan presentar con el fin de desarrollar conclusiones y recomendaciones para el desarrollo de estrategias preventivas que permitan mitigar los efectos del cambio climático en el páramo. Para esto, encontramos en la modelización hidrológica la principal herramienta a utilizar en el desarrollo del presente estudio.

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1. El ecosistema de páramo

El páramo se define como un medio tropical de altura que ocupa grandes espacios altitudinales entre el bosque andino y las nieves perpetuas de los glaciares Andinos de Sudamérica [1]. Se encuentran aproximadamente entre los 3000 y 5000 m.s.n.m. [2]. Forman parte de la gran biodiversidad a nivel de ecosistemas que presenta el Ecuador y son de gran importancia debido a su valor científico y ecológico [3, 4].



En el páramo, el clima se define como tropical de alta montaña. La radiación solar diaria se mantiene relativamente constante a lo largo del año, esto gracias a su cercanía con la línea equinoccial. Esto explicaría el porqué la temperatura media del aire presenta baja variabilidad estacional mientras que el ciclo diario es muy marcado. Debido a su altitud, sus bajas temperaturas con una media de  $7^{\circ}\text{C}$  y la alta incidencia de neblina e irradiación solar, el clima en estos ecosistemas es muy extremo. El mismo, a pesar de mantenerse estable durante todo el año, muestra una diferencia muy apreciable entre el día y la noche. [5, 6]. La precipitación en el páramo es moderada, puede variar entre los 700 mm y los 3000 mm [7]. El páramo presenta gran variabilidad espacio-temporal. Además, la intensidad de las lluvias es baja y el viento es fuerte y cambiante en términos de su dirección, esto se debe principalmente a lo accidentado de su topografía. Las heladas no son frecuentes por debajo de los 4000 m de altitud y cuando se presentan se limitan a pocas horas antes del amanecer [6].

Los suelos de páramo poseen una gran capacidad de retención de agua por lo que funcionan como medio de regulación de flujos hídricos, es decir que trabajan almacenando agua durante períodos húmedos y liberándola durante periodos secos [8, 9]. Esto los vuelve importantes para poblaciones asentadas en o cerca de los valles de páramo en términos de disponibilidad de este recurso fundamental en el establecimiento doméstico, agricultura y abastecimiento de centrales hidroeléctricas [1, 10].

Sin embargo, este ecosistema se ve afectado por diferentes fenómenos antropogénicos y meteorológicos, siendo el cambio climático en el que se centrará la presente investigación.

### 1.1.2. Cambio climático

Según el cuarto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), los cambios en el régimen de precipitación presentaron disminuciones en zonas tales como la parte occidental de Los Andes así como en la Región Andina de Ecuador, Bolivia y Argentina. [11]. El documento técnico correspondiente a la referencia bibliográfica [12] manifiesta que, el cambio climático podría tener una gran incidencia en el ciclo hidrológico, afectando variables como la intensidad espacio-temporal de la lluvia, la escorrentía





superficial y la capacidad de reposición de agua [12]. Esto produciría diferentes tipos de impactos en ecosistemas naturales y actividades antrópicas. Por otra parte, en el quinto informe del IPCC se reporta un incremento en la temperatura global de  $0,8^{\circ}\text{C}$  desde los inicios del siglo XX. Se manifiesta también que, a mediados del presente siglo, y de mantenerse los niveles actuales de emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, se llegaría a producir un incremento de hasta  $2,6^{\circ}\text{C}$  [13, 14].

Las alteraciones meteorológicas sin precedentes observadas desde mediados del siglo XX indicarían que el cambio climático existe y puede llegar a tener consecuencias graves en diferentes ecosistemas terrestres [13, 15]. Temperaturas medias y mínimas medidas por década muestran una tendencia ascendente en la Región Andina a diferencia de las máximas que no han presentado una tendencia marcada aún [14, 12].

El impacto del cambio climático en sistemas hidrológicos ha venido captando mayor atención durante los últimos años debido a sus efectos en los recursos hídricos [16]. Esto, relacionado a sequías y crecidas [17, 18]. Los cambios en el régimen de lluvia están relacionados con los que se manifiestan en la escorrentía y con la disponibilidad de agua, además hay que recalcar que estos, al presentarse en variables como temperatura, humedad y presión atmosférica, representarían una alteración en el sistema hidrológico. Adicionalmente, la evapotranspiración, que es importante para este ecosistema, se vería afectada [16].

## 1.2. Cambio climático en Ecuador

Ecuador se presenta como uno de los países con mayor vulnerabilidad al cambio climático, esto se puede evidenciar en los efectos causados por corrientes marinas como El Niño Southern Oscillation (ENSO) en nuestras costas cada vez que esta se presenta [19].

El fenómeno del cambio climático sería el principal causante de distintas perturbaciones meteorológicas en nuestro país, como la variabilidad del régimen de precipitación, que presenta un aumento importante en la región Costa y una atenuación en la cordillera de Los Andes [20, 21]. Estudios realizados a diferentes registros de precipitación en todo el país, hablan de una elevación en la intensi-



dad de la lluvia, además de un incremento en los valores extremos de la misma, lo que daría origen a una variación representativa en la frecuencia e intensidad de la lluvia en las diferentes regiones del país [20, 21]. Se conoce que, en Ecuador, la temperatura media anual se incrementó  $0,8^{\circ}\text{C}$  entre 1960 y 2006 y que adicional a esto, en el periodo comprendido entre 1960 y 2006 se observó que la temperatura en la región Interandina aumentó en un 8 % y en la región Costa en un 33 % [22, 21]. La variabilidad climática está relacionada con el incremento de eventos climáticos anómalos ya que se ha registrado un aumento gradual en la ocurrencia de los mismos y con una mayor incidencia en la Costa y la Amazonía. La cobertura glaciaria en el país también se ve afectada por el cambio climático, puesto que la misma se ha visto reducida en un 28 % en el período comprendido entre 1975 y 2008, incluso, el volcán Cotopaxi, desde 1976 hasta 2006 perdió un 40 % de sus glaciares, si estos parámetros continúan incrementándose, la disponibilidad de agua para comunidades tanto rurales como urbanas se vería seriamente comprometida en años posteriores. [23, 21, 19].

El análisis de datos oceanográficos y meteorológicos correspondientes a una serie de tiempo de 27 años registrados por estaciones distribuidas a lo largo de la costa de Ecuador muestra que el incremento promedio anual de la temperatura superficial del mar (TSM) es de  $0,0273^{\circ}\text{C}$  y  $0,00575^{\circ}\text{C}$  en la temperatura superficial del aire (TSA). De mantenerse esta tendencia, en 100 años la TSM se habría incrementado  $2,7^{\circ}\text{C}$  y la TSA  $0,57^{\circ}\text{C}$  [24].

### 1.3. Escenarios de emisiones y modelos climáticos

Las investigaciones meteorológicas se valen de modelos climáticos y de un conjunto de diferentes escenarios para evaluar el rango de incertidumbre que provoca el asumir diferentes criterios sobre el cambio en las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) a la atmósfera, representando cada escenario un diferente comportamiento climático de cara al futuro [25].

### **1.3.1. Escenarios de emisiones**

Los escenarios son imágenes de lo que podría suceder en el futuro si se presentaran determinadas condiciones [26]. Resultan en un instrumento apropiado en el análisis de las fuerzas determinantes en la generación de CO<sub>2</sub> y como estas influenciarán emisiones futuras, así como para determinar el margen de error del mismo [26].

Los escenarios se han convertido en una herramienta indispensable para la evaluación de impactos así como para el desarrollo de estrategias de adaptación y atenuación de los efectos del calentamiento global en los diferentes ecosistemas [25, 26]. El Informe Especial del IPCC sobre escenarios climáticos (IE-EE), nos explica que 6 equipos modelizadores desarrollaron 40 escenarios IE-EE, cada uno de ellos con la misma validez. [26].

Los escenarios de emisiones se desarrollan siguiendo cuatro líneas evolutivo-cualitativas que proporcionan a su vez cuatro conjuntos de escenarios a los que se les conoce como “familias” teniendo así la familia A1, A2, B1 y B2. A su vez, el conjunto de escenarios se deriva en 6 grupos de escenarios, un grupo de cada una de las familias A2, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1. Esta última caracteriza el desarrollo de diferentes alternativas energéticas y se subdivide en los grupos A1F1, A1T y A1B [26]. Esto se explica gráficamente en la figura ?? Ver figura 1.1.

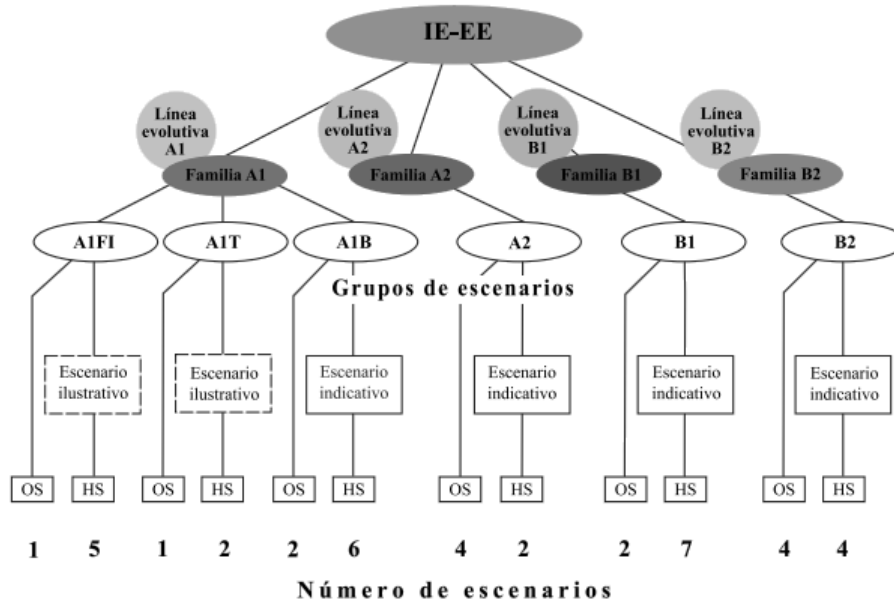


Figura 1.1: Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE Fuente: Informe Especial: Escenarios de Emisiones

Los cambios que se puedan presentar en el mundo para el año 2100 son muy difíciles de predecir. En los escenarios de cambio climático cada una de las líneas evolutivas está basada en una proyección distinta de acontecimientos a futuro, por tanto se dice que cada una tiene un grado de irreversibilidad creciente. Entre las características importantes que abarcan, se encuentran, el desarrollo económico, el cambio tecnológico y el cambio demográfico [26]. A continuación se explicará cada una de las líneas evolutivas y familias de escenarios:

1. **Línea evolutiva y familia de escenarios A1:** El crecimiento de la economía es veloz, se alcanza el máximo valor de población mundial a mediados de siglo para posteriormente disminuir. Introducción intensiva de tecnologías nuevas y eficientes[26].
2. **Línea evolutiva y familia de escenarios A2:** En esta se muestra un mundo más heterogéneo que tiende a la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales como sus características más notables [26].
3. **Línea evolutiva y familia de escenarios B1:** Al igual que en el escenario A1, la población alcanza su máximo a mitad de siglo y posteriormente desciende, la diferencia está en lo rápido de los cambios en lo que son las

estructuras económicas que se orientan a una economía de servicios y de información [26].

4. **Línea evolutiva y familia de escenarios B2:** Las soluciones locales a la sustentabilidad económica, social y medio ambiental predominan en el mundo que caracteriza la familia B2, la población aumenta a un ritmo menos acelerado que en la línea evolutiva A2 y los niveles de desarrollo económico son intermedios [26].

### 1.3.2. Modelos climáticos

Uno de los recursos con los que se cuenta para realizar estudios meteorológicos son los Modelos de Climáticos Globales (GCM por sus siglas en inglés), se definen como modelos tridimensionales que simulan la atmósfera y los océanos a escala global [27].

Funcionan mediante las ecuaciones de las leyes físicas que rigen los procesos de los componentes del sistema climático (Atmósfera, océanos, biosfera y superficie terrestre), así como la conservación de la masa y la energía, por lo que son capaces de simular el comportamiento climático a futuro. Con la simulación de estas ecuaciones de fluidos y de la termodinámica, se consigue una aproximación real del transporte de la materia y la energía. Esto convierte a los modelos climáticos en un elemento de vital importancia en el pronóstico de la tendencia evolutiva de las variables que constituyen el clima [25].

Otra herramienta importante son los Modelos Climáticos Regionales (RCMs por sus siglas en inglés), usados para la desagregación de las salidas de un GCM [28]. Estos son producto de un downscaling dinámico en base a los modelos de circulación global. Algunos RCMs que se utilizan son “PRECIS HADLEY” y “PRECIS ECHAM” [28]. En estudios realizados en Los Andes, por Urrutia et al en 2009, se observó que dependiendo de la región y escala de agregación, los modelos “PRECIS” son un recurso que mejora las simulaciones de los Modelos Climáticos Globales [29].

Los modelos climáticos permiten realizar diagnósticos y pronósticos meteorológicos para la adaptación y mitigación de efectos adversos que pueda ejercer

el cambio climático en el planeta [30].

La incertidumbre de los modelos globales de cambio climático ha sido estudiada en Los Andes tropicales [28]. El alcance de este estudio comprendió las subcuentas de Tomebamba en Monay (1250,9 Km<sup>2</sup>), río Matadero en Sayausí (294,6Km<sup>2</sup>), Jadán (292,1Km<sup>2</sup>) y Paute (2460,4 Km<sup>2</sup>). Se utilizó el escenario A1B del IPCC para el periodo 2011 - 2030. Los principales resultados señalan que a corto plazo los principales efectos sobre las zonas de estudio se dan en la evapotranspiración y precipitación. Aseguran los autores que la reducción de la escala en los modelos climáticos mejoraría ampliamente la comprensión de posibles alteraciones futuras. Mora et al en 2004 en su documento "Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes" encontró una mejor precisión sobre los impactos en la precipitación y en la temperatura de la región. Además, observó que los cambios en la temperatura se mantienen homogéneos para la mayor parte de la región [16]. Adicionalmente, los periodos más calurosos en el año presentaron menores cambios que los periodos fríos. En el caso de la precipitación, los resultados de la reducción de escala mostraron incrementos en la lluvia anual y la intensidad diaria a lo largo de toda la Cuenca del río Paute en todos los escenarios [16].

## 1.4. Modelación hidrológica y estudios realizados en el Ecuador

### 1.4.1. Modelación hidrológica

La modelación hidrológica, intenta simular los procesos relacionados en la distribución de la precipitación y la generación de caudales en una cuenca determinada, esto mediante formulaciones matemáticas [31] que representen el comportamiento de los diferentes fenómenos hidrológicos tratándolos como procesos o sistemas [32].

En los sistemas hidrológicos los flujos de agua entre la atmósfera, superficie y subsuelo son continuos. A pesar de esto, las escalas temporales que tienen los flujos permiten la disgregación del ciclo hidrológico en 3 componentes que

son el superficial, subsuperficial y condiciones iniciales y de borde externas y en la interface, que son las que permiten realizar el acoplamiento y calibración [32]. Esta separación de componentes facilita la comprensión de los diferentes procesos, además de aportar una simplificación matemática y computacional que optimiza recursos [33, 32].

El estudio del cambio climático está ligado a los cambios en las condiciones atmosféricas, pero también debe ser prioritario en los estudios relacionados con la hidrología, mediante esta interacción entre modelos climáticos e hidrológicos se pueden realizar proyecciones sobre inundaciones y sequías [34]. Así, mencionaremos a continuación algunos estudios realizados en el Ecuador por diferentes investigadores Ecuatorianos y extranjeros.

#### **1.4.2. Estudios realizados en el Ecuador**

Uno de los estudios más profundos que se han realizado en nuestra región, investiga el impacto del cambio climático sobre las variables hidrometeorológicas de la cuenca del río Paute [16]. Las subcuencas de análisis fueron la de Tomebamba en Monay y Matadero en Sayausí. El trabajo utiliza series de datos observados tanto de lluvia como de temperatura, en los periodos comprendidos desde 1962 a 1964 y 1992 a 1993, con los escenarios de cambio climático B1, A1B y A2 del IPCC para realizar predicciones entre los años futuros 2045 y 2065. La escala climática global fue reducida a una de tipo regional mediante un enfoque que considera la perturbación, el mismo que se usa para la transmisión de la señal de un sistema climático a uno hidrológico. Mediante la calibración y validación del modelo VHM [35] para cada una de las subcuencas de estudio [36] se modelaron los caudales futuros. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el incremento de la temperatura en esta región puede llegar hasta a los 2°C. Además se observaron mayores cambios en los periodos fríos que en los calientes. Otra variable afectada es la intensidad de la precipitación, que al verse incrementada, produciría picos en los valores de escorrentía. Los incrementos de temperatura, indican los autores, producirían una mayor evapotranspiración y por ende una disminución de los días húmedos.

El trabajo “Aplicabilidad de los modelos NAM y DBM para estimar caudales en subcuencas Altoandinas de Ecuador” [37] usó dichos modelos para estimar los

caudales en las subcuencas Altoandinas de Tomebamba, con una extensión de 1275,4 Km<sup>2</sup> y la microcuenca de Zhurucay Alto, ubicadas en los Andes australes del Ecuador y que abastecen a las cuencas del río Paute y Jubones respectivamente. La capacidad de predicción de los dos modelos fue evaluada y como resultado se obtuvo que las modelizaciones devueltas por el modelo DBM fueron favorables, por lo que se concluyó que este modelo es capaz de adaptarse a los datos de la cuenca de estudio, permitiendo así el desarrollo una interpretación física. Mientras que el modelo NAM presentó predicciones desfavorables, esto debido a la sobrestimación en los valores de evapotranspiración potencial.

Otra investigación realizada es la evaluación del modelo hidrológico VHM para la modelización de caudales en las subcuencas Matadero y Tomebamba [36], este estudio muestra que el modelo VHM es muy útil en el estudio de la región. Una ventaja muy importante de este modelo conceptual es que puede ser adaptado utilizando varios parámetros al mismo tiempo, permitiendo la extracción de información relevante a partir de series de tiempo de descarga observada.

El estudio “Modelación Hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano” [38], realizado en la microcuenca de Zhurucay Alto, la misma que tiene un área de 1,34 Km<sup>2</sup> y se encuentra localizada al suroeste de la ciudad de Cuenca; reveló que es posible utilizar el modelo NAM para la modelación de otras microcuencas. Adicionalmente, según se indica en la investigación, no fue posible identificar un paquete de parámetros óptimo para la modelización de la cuenca, lo que habla de la presencia de una “equifinalidad”, por lo que se deduce que no siempre se puede identificar un solo paquete de parámetros óptimos para un modelo conceptual agregado. También se pudo identificar que los límites generales en las predicciones obtenidas por el modelo pueden ser aceptables según los parámetros empleados. Adicionalmente, se observó que la simulación presenta una sobrestimación del flujo base.

## 1.5. Justificación

Un incremento en la temperatura del suelo, producto del cambio climático, puede variar su contenido de carbón orgánico, reduciendo su almacenamiento, y liberándolo a la atmosfera [39]. Además, cambios en el régimen de precipitación,





incrementos en los valores de evapotranspiración, sumados a alteraciones en el carbono orgánico contenido en el suelo, pueden tener alto impacto en el suministro de agua [39].

El calentamiento global podría estar afectando a este importante ecosistema y con ello rompiendo sus bondades en la regulación del recurso hídrico. Es por eso que se considera importante el estudio de este frágil medio [8].

Con lo detallado anteriormente, se pretende establecer bases que evidencien la necesidad de estudiar el cambio climático y los efectos negativos que este puede tener sobre las cuencas de páramo. Esto, debido a que podría estar alterando elementos climáticos como temperatura, viento, precipitación, evapotranspiración, y con ello a los caudales que estas producen, comprometiendo así la disponibilidad de agua para las comunidades que tienen a estas cuencas como su principal fuente de abastecimiento hídrico.

El presente documento pretende aportar información relevante que permita cuantificar la magnitud que tiene el cambio climático sobre los recursos hídricos provenientes de cuencas hidrográficas de alta montaña. Para este propósito se usarán diferentes escenarios de emisiones futuras de CO<sub>2</sub>, cada uno de ellos con diferentes modelos climáticos. Adicionalmente se hará uso de la importante herramienta que constituye la modelización numérica de lluvia escorrentía [40]. Lo que se intenta, es inferir y estimar los efectos a largo plazo que tendría el calentamiento global en la cuenca de páramo estudiada. La finalidad de esto, es realizar recomendaciones que permitan la elaboración de estrategias para la adaptación y mitigación de los mismos en un futuro.

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo general

Analizar el impacto del cambio climático en los caudales a la salida de la cuenca de páramo Huagraguma, ubicada en la cabecera de la subcuenca del río Machángara, mediante la calibración y validación del modelo hidrológico conceptual VHM, con series futuras de precipitación y evapotranspiración, agregadas en



una escala horaria.

### 1.6.2. Objetivos específicos

- Recopilar y procesar información sobre precipitación, evapotranspiración y caudales que se utilizará en la modelización numérica.
- Calibrar y validar el modelo VHM para la cuenca Huagrahuma y evaluar su eficiencia mediante el método del Error Medio Cuadrático (MSE) y el coeficiente normalizado de Nash-Sutcliffe (NSE).
- Modelizar caudales con series futuras de precipitación y evapotranspiración.
- Analizar los efectos del cambio climático en los caudales de la cuenca estudiada.

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

## Capítulo 2

# Materiales

### 2.1. Descripción de la zona de estudio

La cuenca de estudio se encuentra ubicada al noroeste de la ciudad de Cuenca, tiene un área de 2,33 km<sup>2</sup>, su altura máxima se encuentra a 4120 m.s.n.m y pertenece a la cabecera de la subcuenca del río Machángara, la misma que tiene una extensión de 325 Km<sup>2</sup> y que es tributaria del río Paute. Sus coordenadas son Longitud W 78° 58' 30" hasta 79° 00' 00", Latitud S 02° 48' 00" hasta 02° 36' 00". Su delimitación se realizó utilizando el software ArGis como se puede ver en la figura 2.1.

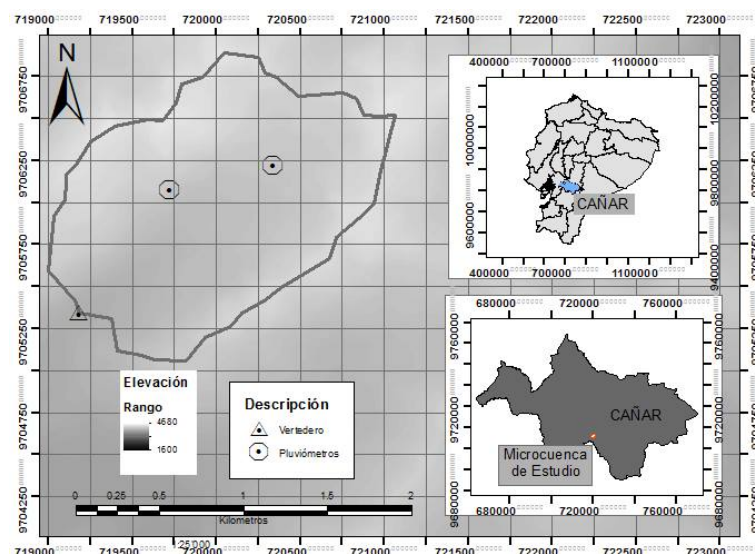


Figura 2.1: Mapa de la Microcuenca Huagrahuma

## 2.2. Descripción de la base de datos disponible

### 2.2.1. Datos de precipitación

Los datos de precipitación corresponden a dos estaciones pluviométricas tipo Onset con una resolución de 0,2mm y están ubicadas en la cuenca de estudio. La estación Huagrahuma alto ubicada a 3525 m.s.n.m con coordenadas 2,6563°S 79,0182°O, y la estación Huagrahuma medio a una altura de 3590 m.s.n.m y con coordenadas 2,657°S 79,023°O. Se utilizarán dos periodos de datos, el comprendido entre 01/09/2010 0:00 y 30/12/2011 0:00 y el periodo entre 20/03/2012 0:00 31/08/2012 23:00. Los datos fueron registrados en la estación y posteriormente agregados en una escala temporal con intervalos de 1 hora. Este procedimiento se indica en la sección 3.1.

### 2.2.2. Datos de caudal

Los datos de caudal corresponden a un vertedero triangular ubicado a 3659 m.s.n.m con coordenadas 78,926°O 3,151°S. Los datos de caudal están medidos cada 15 minutos y posteriormente se los agregó en una escala temporal de intervalos de 1 hora. Este procedimiento se indica más adelante en la sección 3.2



Figura 2.2: Vertedero Triangular a la salida de la microcuenca Huagrahuma

### **2.2.3. Datos de evapotranspiración**

Para la determinación de la evapotranspiración se utilizaron los datos de la estación climática La Esmeralda, la misma que se encuentra a una altura de 2638 m.s.n.m con coordenadas 3,151°S 78,926°O. La estación no proporciona datos de evapotranspiración directamente. Pero esta se calculará en función de los datos de temperatura, latitud y días de sol.

### **2.2.4. Escenarios de cambio climático**

Para el presente estudio, se han utilizado 3 escenarios de cambio climático, el A2, A1B y B1, con el fin de realizar proyecciones en los casos de mayor impacto, impacto medio y bajo impacto respectivamente. Los escenarios están presentados en escala diaria, por lo que se necesitará un procedimiento para reducir su escala a un intervalo horario, el mismo que se explica en la sección 3.9. Para la determinación de los modelos climáticos de cada escenario, se utilizaron estaciones cercanas a la cuenca Huagrahuma y se realizó un downscaling estadístico basado en la técnica de quantile perturbation factors. [41]. Con esto se obtienen series de precipitación y evapotranspiración desde el año 2000 hasta el año 2100 agregados en escala diaria.

El escenario A2 consta de 27 modelos climáticos, el A1B de 34 modelos y el B1 de 32 que se identifican en la tabla 6.1 en la sección 6.3:

## **2.3. WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool**

Para llevar a cabo la modelización necesitaremos separar la serie de caudales en sus subflujos, para eso utilizaremos el software WETSPRO [42], su funcionamiento se detalla a en la sección 6.4, dicha información corresponde al manual de utilización del programa.

## 2.4. Descripción del modelo hidrológico VHM

El modelo VHM se define por ser un modelo conceptual agregado de lluvia escorrentía que basa su calibración en un proceso iterativo realizado por el usuario. Acopla a su estructura otros submodelos, los mismos que están formados por ecuaciones que representan como se reproducen los procesos en la estructura del mismo [43].

Tiene el fin de simular los procesos de lluvia escorrentía que se dan en las cuencas hidrográficas. El modelo se basa en los procesos del suelo y otros parámetros que deben calibrarse para su utilización. Se emula el comportamiento del agua ubicada en la superficie del suelo en su zona no saturada y que posteriormente se dirige a la zona subterránea [43].

Sus componentes de trabajo son el flujo base, el interflujo y el flujo superficial de la serie de caudales observados [43].

Se debe tener en cuenta la posibilidad de sobreparametrizaciones, que se presentan cuando la serie de tiempo es muy larga y se tienen muchos datos. No siempre es necesario tener gran cantidad de datos, pues se pueden generar conflictos entre las relaciones que se intentan identificar. Es primordial definir los parámetros a ser ingresados en el modelo y simplificar la información para optimizar la calibración del modelo [43]. Ver la figura 2.3

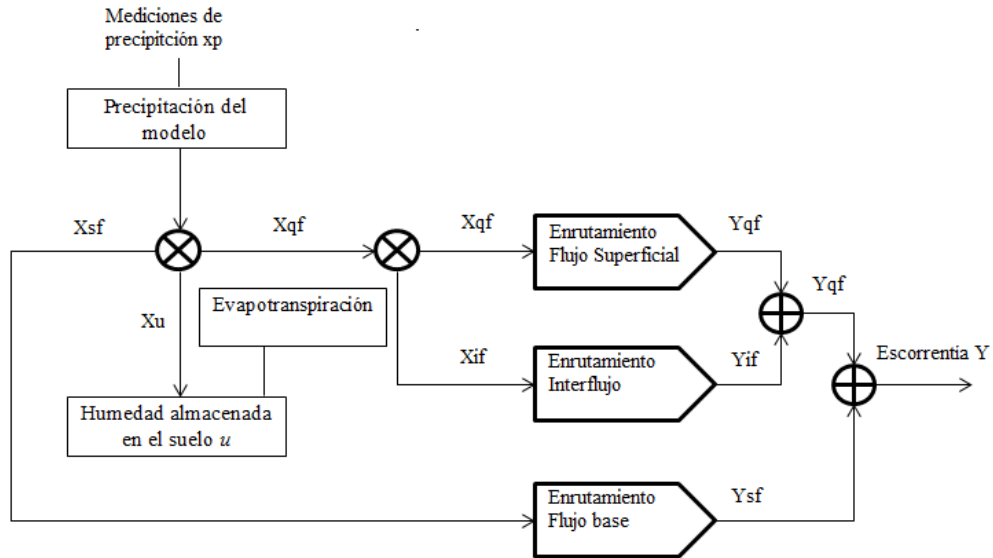


Figura 2.3: Esquema del funcionamiento del modelo VHM.

En el esquema mostrado en la figura 2.3 [43], se muestra como la precipitación a la entrada es dividida en fracciones que a su vez contribuyen a los 3 tipos de subflujos mediante lo que podría definirse como una válvula de distribución de tiempo variable [43].

Como se explicó anteriormente, los modelos de reservorio lineal tienen recesiones exponenciales de flujo durante los periodos de recesión, por esta razón estos modelos son muy utilizados. Los flujos separados posteriormente son transferidos a la descarga y escorrentía mediante enrutamientos [43].

### 2.4.1. Transformaciones de Box-Cox

Son transformaciones potenciales que se usan en análisis estadísticos para la corrección de sesgos en la distribución de los errores, así como para la corrección de varianzas desiguales y para la corrección de no linealidad en la relación entre las variables, es decir que mejora la correlación entre las mismas [44].

### 2.4.2. Estructura del modelo conceptual VHM

La información presentada en la presente sección corresponde a la referencia bibliográfica [43] desarrollada por Willems et al en 2014.

Las diferentes ecuaciones de procesamiento del modelo VHM son identificadas y calibradas basándose en diferentes configuraciones de información no conmensurable obtenida de series de caudales, mediante diferentes procesamientos de series de tiempo. Esto incluye la separación del caudal en sus diferentes flujos, la separación de las series en eventos casi independientes de flujo rápido y lento y la extracción de los picos de flujo [43].

Posterior a la separación de los subflujos de recesión y los modelos relacionados de enrutamiento, una serie de ecuaciones describen las respuestas de los flujos rápidos y lentos, el almacenamiento de agua en el suelo se deriva de las series de tiempo de caudal y precipitación [43]. La concepción del modelo y su calibración, además, cuenta para las interpretaciones estadísticas y requerimientos en la independencia y homocedasticidad de los residuos del modelo [43].

El desempeño del modelo se evalúa basándose en los volúmenes de los picos de flujo así como en los valores extremos de flujos altos y bajos, esto siguiendo el método de Willems (2009) [43].

El número final de parámetros del modelo, depende de los procesos de la estructura de identificación obtenidas para el caso de estudio [43]. Para el caso de la presente tesis tendríamos los submodelos que conforman el modelo VHM, el submodelo de almacenamiento (Storage model), el submodelo de flujo superficial (Overland flow model), el submodelo de interflujo (Interflow model) y los modelos de enrutamiento (Routing models) [43].

En el primer paso, se usa una ecuación para identificar la relación entre la fracción de lluvia que contribuye al almacenamiento y el nivel relativo de almacenamiento (Nivel relativo de saturación del suelo) [43]. Los eventos se van definiendo mediante la separación de los caudales observados en hidrogramas aproximadamente independientes basados en criterios hidrológicos de independencia [43]. Para cada uno de estos eventos, la fracción de precipitación contribuyente al almacenamiento puede ser computada empíricamente como la fracción restan-



te luego de sustraer el evento observado de caudal y de evapotranspiración del volumen de entrada del modelo. Las variaciones temporales en el volumen de almacenamiento pueden ser estimadas empíricamente por medio de la acumulación en el tiempo de las fracciones de precipitación que aportan al almacenamiento y restando los volúmenes de evapotranspiración. Para el estudio se definen dos relaciones, una lineal y otra exponencial entre la variación temporal de la fracción de escorrentía que se almacena ( $f_u$ ) y el nivel de almacenamiento  $u$  [43].

La evapotranspiración real es determinada en función de la evapotranspiración potencial que se ingresa en el modelo [43].

El modelo de almacenamiento tiene así, 4 o 5 parámetros de calibración,  $au,1$ ,  $au,2$ ,  $au,3$ ,  $U_{max}$  y  $U_{evap}$  y una condición inicial para el almacenamiento  $u$ , que se denota por  $u_{ini}$  [43]. Los parámetros del modelo se calibran mediante la optimización de los eventos simulados vs los basados empíricamente en los volúmenes de almacenamiento, luego de una transformada de BOX y COX para medir la heterocedasticidad en el volumen residual. Esto se realiza de manera visual por el usuario mediante el grafico de dispersión BC o reduciendo el valor del error medio cuadrático [43].

En el segundo paso es el submodelo para el flujo más rápido, es decir el flujo superficial [43]. Para esto, se usan dos procesos conceptuales que son el flujo superficial por exceso de saturación y por exceso de infiltración. El exceso de saturación es identificado analizando el tipo de relación entre la fracción de lluvia que contribuye al flujo superficial y el nivel relativo de almacenamiento [43]. Las variaciones temporales en el nivel relativo de almacenamiento se obtuvieron en el primer paso, mientras que la fracción de lluvia que contribuye al flujo superficial se obtiene empíricamente. Los últimos volúmenes son derivados de la separación de flujos de los caudales observados usando una técnica numérica de filtrado [43].

El proceso de infiltración en exceso, en un siguiente paso, es utilizado siempre y cuando se lo haya identificado con la información disponible. Esto se hace analizando si la fracción que contribuye al flujo superficial depende de la lluvia antecedente  $s$ . Así, se identifica una relación para el exceso de infiltración del flujo superficial [43].

El modelo de flujo superficial cuenta con 3 parámetros de calibración y el

periodo antecedente para el cálculo de la lluvia antecedente. Estos parámetros se calibran visualmente por el usuario en la transformación BC o reduciendo el error medio cuadrático [43].

En el tercer paso, el submodelo para el interflujo se estima mediante lineamientos similares a los del flujo superficial. 4 parámetros se utilizan para su calibración además del periodo antecedente [43].

La lluvia restante, es decir la que no contribuye con el almacenamiento, evapotranspiración, flujo superficial o interflujo, es la que se convierte en flujo lento. La suma del flujo superficial y el interflujo toma el nombre de flujo rápido [43].

En el paso final, el enrutamiento de los submodelos de flujo lento, interflujo y flujo superficial se basa en el modelo de reservorio lineal con constantes de recesión  $K_{sf}$ ,  $K_{if}$  y  $K_{of}$ . Estas constantes se estiman como parte de la separación de flujos [43]. Las condiciones iniciales para estos reservorios son el flujo lento inicial, y el interflujo inicial. Estos, también son considerados como parte del proceso de separación de flujos. Dependiendo del caso, el flujo superficial inicial puede ser asumido como cero [43].

Para la evaluación de su eficiencia se puede utilizar el método del error medio cuadrático (MSE) y el método normalizado de Nash-Sutcliffe (NS), que se explicarán en las secciones 3.7 y 3.8.

## Capítulo 3

---

# Metodología

---

### 3.1. Datos de precipitación

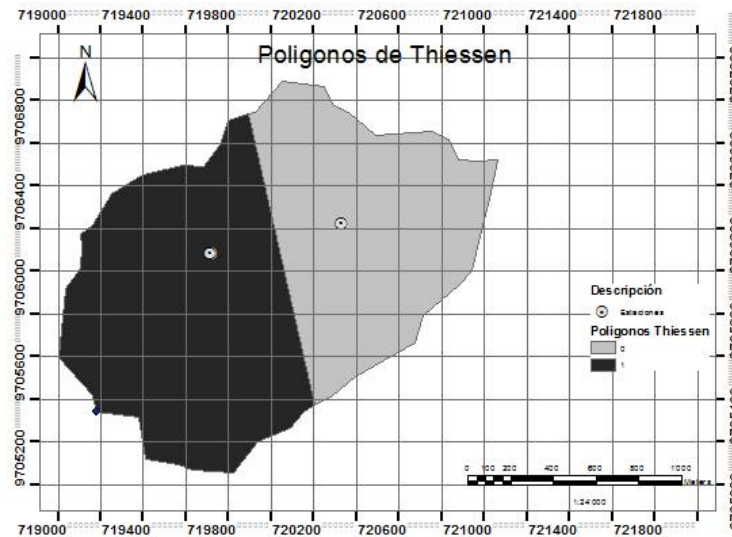
Los datos de precipitación fueron obtenidos de dos estaciones, las mismas que se encuentran ubicadas en la cuenca de estudio como se explicó anteriormente. Los datos fueron agregados en una escala horaria en el periodo comprendido entre 01/09/2010 0:00 y 30/12/2011 0:00 para los procesos de calibración y el periodo 20/03/2012 0:00 31/08/2012 23:00 para la validación, estos periodos se seleccionaron en función de la calidad de información, pues eran los que mayor continuidad y calidad en las mediciones presentaban. Teniéndose un total de 11688 datos de precipitación en el periodo de calibración para los pasos posteriores y 3960 para el periodo de validación. Una vez determinada la serie de tiempo, se procedió a utilizar el método “GAP FILLING BASED ON A QUANTILE PERTURBATION FACTOR TECHNIQUE” desarrollado por Mora (2014) para el relleno de vacíos.

#### 3.1.1. Determinación de una serie única de precipitación

Al tener dos estaciones en la cuenca, se procedió a determinar los polígonos de Thiessen, que servirán para identificar el área de influencia de cada estación dentro de la cuenca. Para esto se utilizó el programa ArcGis.

Una vez determinados los polígonos de Thiessen se calcula el porcentaje de influencia de cada estación, dividiendo el área de cada polígono para el área total

de la cuenca, obteniendo para la estación de Huagrahuma Alto un valor de 0.4424 de influencia y de 0.5576 para la estación Huagrahuma Medio.



Posterior a esto, las series de precipitación son multiplicadas por su valor de influencia respectivo y se suman dando lugar a una serie única de precipitación en un rango horario para el área de estudio. Este proceso se realiza de igual manera para el periodo de calibración y de validación.

### 3.2. Datos de caudal

Los datos de caudal fueron determinados en base a mediciones periódicas cada 15 minutos de la altura “h”, tomada desde la cresta del vertedero triangular hasta la superficie de la lámina de agua y restando el valor p promedio que es igual a 0,01 m y corresponde a la ubicación del sensor. Posteriormente, estos valores son ingresados en la ecuación del vertedero, la misma que fue proporcionada por el Programa Para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS), y que tiene los siguientes términos:

$$Q = 1,38H^{\frac{5}{2}} \quad (3.1)$$

Dónde:

H: Altura desde la cresta del vertedero a la superficie de la lámina de agua.

Una vez calculados los caudales medidos cada 15 minutos, procedemos a agregarlos de manera horaria, esto se realizó promediando todas las mediciones comprendidas dentro de una hora. Este procedimiento se realiza para el periodo de calibración y validación. Con esto se tienen determinada la serie de caudales que se usará en la modelización hidrológica en los pasos de calibración y validación.

### 3.3. Serie de evapotranspiración

Para determinar la serie de evapotranspiración, se utilizó la información de la estación climática La Esmeralda, facilitada por el PROMAS.

Con esta información se utilizó la fórmula de Thornthwaite, que se sigue la siguiente metodología:

1. Se calcula un índice de calor mensual, (i) por medio de la temperatura media mensual mediante la ecuación 3.2:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (3.2)$$

2. Se calcula el índice de calor anual realizando la sumatoria de los 12 valores de (i)
3. Posteriormente se determina el valor de ETP mensual sin corregir de la ecuación 3.3:

$$ETP_{sincorr} = 16\left(\frac{10t}{I}\right)^a \quad (3.3)$$

En donde:

ETP sin corregir: ETP mensual medida en mm/mes para los meses de 30 días con 12 horas de sol.

t: Temperatura media mensual medida en grados centígrados. i: Índice de calor anual.

El valor de “a” se determina mediante la ecuación 3.4:

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0,49239 \quad (3.4)$$

4. A continuación, mediante la ecuación 3.5, el método plantea una corrección para el número de días de cada mes y el número de horas de sol diarias:

$$ETP = ETP_{sincorr} \times \frac{N}{12} \times \frac{d}{30} \quad (3.5)$$

Dónde:

N es el número máximo de horas de sol, que depende del mes y de la latitud, para la zona de estudio, para determinar este parámetro utilizaremos una tabla e interpolaremos los valores. Además “d” representa el número de días del mes.

Los datos donde se interpolan las horas de sol diarias para la latitud de la zona de estudio se detallan a continuación en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Número máximo de horas de sol diarias para cada mes del año

Mes	Horas de sol diarias
Enero	11,87
Febrero	11,94
Marzo	12,00
Abril	12,13
Mayo	12,19
Junio	12,25
Julio	12,00
Agosto	12,19
Septiembre	12,06
Octubre	12,00
Noviembre	11,94
Diciembre	11,87

Tabla 3.2: Evapotranspiración mensual

Fecha	ETP Corregida
(Mes y Año)	(mm/mes)
ene-12	59,00
feb-12	53,18
mar-12	56,78
abr-12	55,75
may-12	52,26
jun-12	51,04
jul-12	47,84
ago-12	46,24
sep-12	47,82
oct-12	55,96
nov-12	58,55
dic-12	56,61

Como se observa en la tabla 3.2, el valor de la evapotranspiración se encuentra expresado en mm/mes y hasta ahora nuestros valores obedecen a series de tiempo horarias, por lo que es necesario reducir la escala espacio-temporal de nuestros datos de evapotranspiración; el proceso se describe a continuación.

1. Se divide el valor de evapotranspiración para el número de días de su mes respectivo.

2. Posteriormente, éste valor en mm/día se dividió dentro de las 24 horas que dura un día mediante el uso de una distribución normal, esto con el principio de que a horas de la noche y la madrugada el valor de evapotranspiración tiende a cero, mientras que a horas del mediodía este parámetro se maximiza.

El resultado de este procedimiento para el mes de enero se muestra en la figura 3.1.

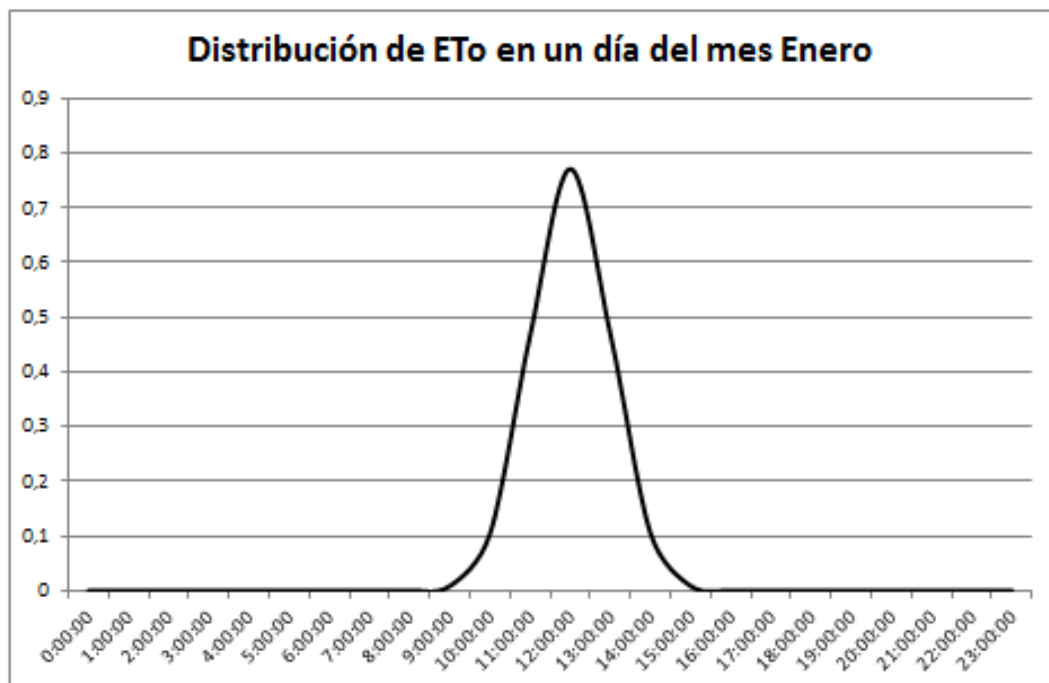


Figura 3.1: Evapotranspiración potencial para un día del mes de enero

De esta manera se estimaron los valores de evapotranspiración potencial en mm/hora para la modelización.

### 3.4. Separación de flujos en WETSPRO

Para la calibración, ingresamos nuestras series de tiempo y de caudales en la hoja input del programa, luego, en la hoja Subflow Filtering ajustamos los



parámetros, “constant term [unit of series]”, “initial flow value[unit of series]”, “number of filter steps”, “recession constant [number of time steps]“, “w-parameter filter [-]” y hacemos correr el programa dando click en el botón “Execute base-flow”. En la hoja “Filter Results-BF” comprobamos que la línea amarilla, que corresponde a la pendiente de la constante de recesión, tenga la misma inclinación que los periodos de recesión en nuestra serie de caudales, y, además. comprobamos que la línea color rosa, que corresponde a la estimación del flujo base, empate con los puntos más bajos de la serie de tiempo de caudales observados, sin sobrepasarla para evitar sobreestimaciones o que no quede muy por debajo de la misma para evitar que se subestime este el flujo. Los parámetros se calibran iterativamente y su correcta estimación se determina de forma visual.

En la siguiente parte repetimos este procedimiento para el interflujo y el flujo base. De esta manera, se realiza la separación de flujos para la modelización en el software VHM.

## **3.5. Calibración del modelo VHM**

### **3.5.1. Ingreso de datos para la modelización**

Para la calibración del modelo VHM primero debemos ingresar en la sección de “Input and Generalities” el área de la cuenca y la escala temporal que utilizaremos en nuestra modelización, que como se ha explicado en secciones anteriores, es horaria. Posteriormente ingresamos los valores correspondientes a precipitación, evapotranspiración y caudales en la hoja “Time series” y procedemos al proceso de calibración de los submodelos de flujo.

### **3.5.2. Calibración del modelo de almacenamiento**

El paso 2 corresponde al modelo de almacenamiento, en éste, modificamos los parámetros  $u_{max}$ ,  $uevap$ ,  $u_{init}$ , así como los valores  $c_1$  y  $c_2$  iterativamente, hasta reducir al máximo el valor del error medio cuadrático y hasta ajustar los puntos dentro de las líneas en el gráfico Box-Cox. Los parámetros del modelo de

abstracción en la parte 2 no fueron modificados y en la parte 3 el valor de  $\lambda$  para la transformada de Box-Cox se tomó como 0.01.

### **3.5.3. Calibración del modelo de flujo superficial**

En el paso 3 calibraremos los parámetros del flujo superficial, utilizando la misma metodología que se usó para el paso 2. Modificamos los valores de  $c_1$ ,  $c_2$ , el valor de  $\lambda$  para la transformada de Box-Cox, las horas antecedentes y los valores de  $c_3$  y  $c_4$ , en este orden.

### **3.5.4. Calibración del modelo de interflujo**

La calibración del modelo de interflujo corresponde al paso 4 del modelo VHM, en esta parte el procedimiento no es diferente al de los pasos anteriores, así que procedemos a la calibración de los parámetros del modelo de la misma manera.

### **3.5.5. Enrutamiento de los flujos**

En el paso 5, vamos a hacer el enrutamiento de los flujos, para esto ingresamos los valores de las constantes de recesión y el valor inicial de cada flujo, estos valores fueron obtenidos en el proceso de separación de flujos con WETSPRO. Los ingresamos y se procederá a modelar las dinámicas de los 3 flujos que ingresamos.

## **3.6. Validación del modelo VHM**

Para esta sección se selecciona los valores observados de precipitación, evapotranspiración y caudales en el periodo comprendido entre 20/03/2012 0:00 31/08/2012 23:00 y se corre el modelo con los mismos parámetros que en la calibración. Los resultados de este ejercicio se comparan con los obtenidos en el proceso de calibración, y se procede a seleccionar con qué periodo se trabajará en adelante.

### 3.7. Evaluación de eficiencia

A continuación se evalúa la eficiencia del modelo utilizando dos criterios. El error medio cuadrático y el método de Nash-Sutcliffe

#### 3.7.1. Método del error medio cuadrático

El error medio cuadrático (MSE) es un criterio usado en la evaluación de eficiencia de modelos hidrológicos con datos observados [45]. Depende de las unidades de la variable modelada en el intervalo  $[0,0, \text{Inf}]$ . Su ecuación es la siguiente:

$$MSE = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^n (Q_o - Q_m)^2 \quad (3.6)$$

Dónde:

n: Número de datos observados

$Q_o$  : Caudal observado.

$Q_m$  : Caudal modelado

El criterio del error medio cuadrático se aplicó para el flujo base, interflujo, flujo superficial y flujo total.

#### 3.7.2. Método de Nash-Sutcliffe

Para la determinación de la eficiencia del modelo utilizaremos el método normalizado de Nash-Sutcliffe [46]. El mismo que se encuentra en el intervalo  $[-\text{inf}, 1]$  [45]. Su formulación se describe a continuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{to} - Q_{tm})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{to} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3.7)$$

Dónde:

$Q_o$ : Caudal observado.

$Q_m$ : Caudal modelado.

$\overline{Q_o}$ : Caudales observados promedio.

El método de Nash-Sutcliffe se aplicó para el flujo base, interflujo, flujo superficial y flujo total.

### 3.8. Series de datos futuras

Posterior a la calibración, validación y evaluación de eficiencia del modelo VHM, se procede a la modelización de caudales con series futuras de precipitación y evapotranspiración, para esto se utilizaron los 3 escenarios de cambio climático detallados en la sección 2.2.4 del presente trabajo, corriendo los GCM/RCM de cada uno con en el modelo VHM sin alterar los parámetros de calibración y de esta manera obteniendo como resultado caudales de escenarios futuros modelados.

La escala temporal de los diferentes GCM/RCM es diaria, por lo que se necesita reducirla a escala temporal horaria, para esto se siguió la siguiente metodología:

Utilizando información observada en escala horaria, se determinó el valor de precipitación que se acumularía diariamente dentro del periodo de estudio. Posteriormente, cada valor de lluvia horaria fue dividido para su correspondiente valor de precipitación diaria. De esta manera se generaron pesos en la distribución horaria de lluvia. Lo siguiente fue multiplicar estos pesos por el valor de precipitación diaria correspondiente a los mismos días en cada modelo. Así, la lluvia se distribuye horariamente siguiendo el mismo patrón de comportamiento que los datos observados. Se asumió esto, en función de que dividir el valor de precipitación equitativamente dentro de las 24 horas del día, no representa bajo ningún concepto el comportamiento de la lluvia dentro del ecosistema. Mediante el uso de la técnica descrita, la distribución diaria de la precipitación a nivel horario está sustentada gracia a la serie de observaciones. Esta distribución representaría a la variabilidad diaria de precipitación en escenarios futuros a ser aplicada en el



área de estudio.

De este manera se modelaron los caudales futuros correspondientes a cada escenario de cambio climático.

Los caudales modelados se encuentran dentro del mismo periodo de la modelización pero proyectados a 50 años es decir 01/09/2060 0:00 y 30/12/2061 0:00.



## Capítulo 4

---

# Metodología de Análisis

---

Una vez modelados los caudales futuros, se debe analizar e interpretar estos datos con el fin de recolectar la mayor cantidad de información que nos permita realizar conclusiones sobre el impacto del cambio climático en la cuenca de estudio. Para esto se utilizarán conceptos de la estadística descriptiva de dispersión, y una de nuestras principales herramientas serán los diagramas de caja y bigotes o box-plots. Estos gráficos permiten realizar el análisis de los datos obtenidos de una forma rápida y eficiente, puesto que nos permite realizar comparaciones que incorporan varios parámetros al mismo tiempo.

Los valores que se representan en los diagramas de caja, son los correspondientes al Q10, la mediana o Q50 y el Q90 que son los que conforman la caja con el valor del Q50 dividiéndola de una manera no simétrica, dicha división nos muestra hacia donde se distribuyen los valores, el Q10 y Q90 son líneas paralelas a la mediana, y los bigotes superior e inferior nos representan los valores máximos y mínimos [47].

### 4.1. Comparación de caudales observados con los modelados

Para cada escenario, se determinará el valor promedio del Qmin, Q10, Q50, Q90 y Qmax y se determinará su variación con respecto a los mismos parámetros en los valores observados. Con este análisis estimaremos los efectos del cambio climático en la cuenca de estudio para los 3 escenarios de cambio climático selec-

cionados.

## **4.2. Análisis de los periodos de sequía**

Se analizan los periodos de sequía de los datos observados, es decir, se identifica la cantidad de periodos de sequía en días que se presentaron en la cuenca Huagrahuma durante el intervalo de tiempo seleccionado 01/09/2010 0:00 y 30/12/2011 0:00, así como su promedio, el Q75, Q90 y el periodo de sequía máximo registrado.

Adicional a esto, se determinan los mismos parámetros para todos los GCMs y RMCs comprendidos en cada escenario y posteriormente se estimará el promedio de periodos de sequía, promedio de días de sequía, el promedio de los Q75 y Q90 y el promedio de los periodos máximos de sequía. Estos resultados se compararán con los valores actuales, lo que nos dará una idea de cómo será el comportamiento de la cuenca en los diferentes escenarios de cambio climático.

Para determinar que valores de caudal corresponden a un periodo de sequía se necesita establecer un criterio general similar para los datos observados y modelados, el presente estudio contempla que, si un valor de caudal es menor que el correspondiente al Q25 del flujo base observado [48], pues dicho caudal corresponde a un periodo de sequía. Para realizar este análisis se generó un código de Visual Basic (VBA) que nos permite realizar esta comparación de manera más rápida y efectiva.

Los resultados de estos análisis se detallan en el capítulo 5.

## Capítulo 5

---

# Resultados

---

### 5.1. Calibración del modelo VHM

#### 5.1.1. Calibración del modelo de almacenamiento

Con estos valores el error medio cuadrado se redujo hasta 0,1855 por lo que se considera una calibración aceptable del submodelo.

Tabla 5.1: Parámetros de calibración del modelo de almacenamiento

Parámetros	Valores
umax	205
uevap	100
uinit	5
c1	1
c2	0,7

#### 5.1.2. Calibración del modelo de flujo superficial

Iterando estos valores, se logró reducir el error medio cuadrado hasta 0,1686 lo que nos indica una buena calibración.



Tabla 5.2: Parámetros de calibración para el flujo superficial

Parámetros	Valores
c1	-2,96
c2	1,45
Lambda	0,01
Horas antecedentes	1
c3	-1,39
c4	-0,37

### 5.1.3. Calibración del modelo de interflujo

El error medio cuadrático se redujo hasta 0,1648, por lo que podemos decir que es una buena calibración.

Tabla 5.3: Parámetros de calibración para el Interflujo

Parámetros	Valores
c1	-2,41
c2	1
Lambda	0,01
Horas antecedentes	1
c3	-0,38
c4	-0,49

## 5.2. Eficiencia mediante el error cuadrático medio

Los resultados de la evaluación de eficiencia mediante el método del error cuadrático medio se presentan en las tablas 5.4 y 5.5

Tabla 5.4: Eficiencia de MSE en la calibración

Flujo	Eficiencia	Valoración
MSE Flujo Base	0,00065	Buena
MSE Interflujo	0,00195	Buena
MSE Flujo Superficial	0,00035	Buena
MSE Flujo Total	0,00368	Buena

Tabla 5.5: Eficiencia de MSE en la validación

Flujo	Eficiencia	Valoración
MSE Flujo Base	0,00151	Buena
MSE Interflujo	0,00391	Buena
MSE Flujo Superficial	0,00043	Buena
MSE Flujo Total	0,00629	Buena

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

### 5.3. Eficiencia con el método de Nash-Sutcliffe

Mediante la metodología descrita en la sección 3.8 se calculó la eficiencia con el método normalizado de Nash-Sutcliffe, obteniéndose así las eficiencias en la modelización mostradas en las tablas 5.6 y 5.7.

Tabla 5.6: Eficiencia de Nash-Sutcliffe en la calibración

Flujo	Eficiencia	Valoración
NSE Flujo Base	0,54	Aceptable
NSE Interflujo	0,56	Aceptable
NSE Flujo Superficial	0,22	Mala
NSE Flujo Total	0,64	Aceptable

Tabla 5.7: Eficiencia de Nash-Sutcliffe en la validación

Flujo	Eficiencia	Valoración
NSE Flujo Base	-1,35	Muy Mala
NSE Interflujo	0,054	Mala
NSE Flujo Superficial	0,049	Mala
NSE Flujo Total	0,20	Mala

Como se puede observar, los valores de la eficiencia son mayores para la calibración que en la validación, por lo que se optará por usar los valores correspondientes al periodo de calibración para la modelización con series futuras. A su vez, dentro de las eficiencias determinadas para el periodo de calibración, se observa que el mayor valor corresponde al flujo total, por tanto, en los siguientes pasos utilizaremos caudales totales dentro del mismo periodo que el de calibración pero proyectado 50 años.

Como se explicó anteriormente, la evaluación de eficiencia de Nash-Sutcliffe nos dio un valor alto para el flujo total dentro del periodo de calibración, por lo que de aquí en adelante los caudales modelados corresponden al flujo total a la salida de la cuenca de estudio.

## 5.4. Análisis de variación de caudales en escenarios futuros

En esta sección se generaron diagramas de caja y tablas con los valores de cada escenario para el periodo de caudales observados y para los caudales modelados en cada escenario de cambio climático con el objetivo de realizar su análisis estadístico y determinar los resultados del presente estudio.

Tabla 5.8: Resultados generales obtenidos

	Actual	A2	A1B	B1
<b>Qmin (m3/s)</b>	0,0121	0,0054	0,0056	0,0060
<b>Q10 (m3/s)</b>	0,0177	0,0142	0,0152	0,0171
<b>Q50 (m3/s)</b>	0,0453	0,0388	0,0400	0,0447
<b>Q90 (m3/s)</b>	0,1723	0,1074	0,1070	0,1043
<b>Qmax (m3/s)</b>	1,0693	0,4178	0,3991	0,3363

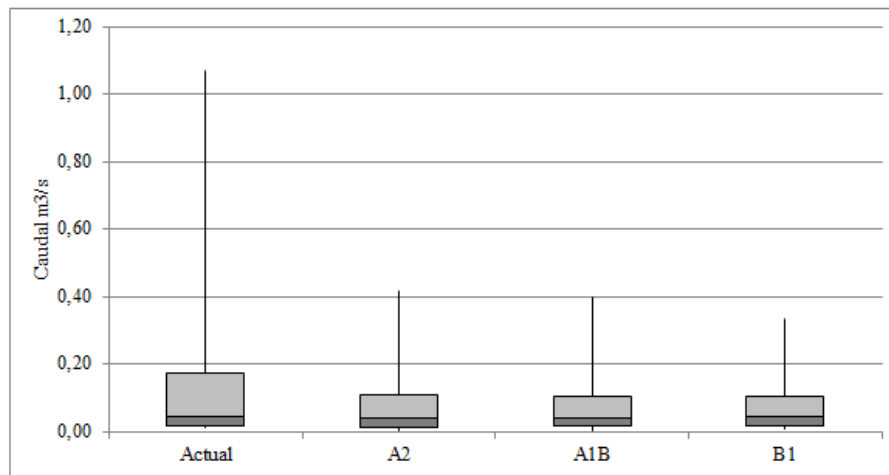


Figura 5.1: Diagramas de caja para el periodo observado y los escenarios A2, A1B y B1

En la tabla 5.8 se presentan los valores obtenidos en el proceso estadístico que se llevó a cabo para el análisis de cambio climático considerando todos los GCM/RCM para cada escenario climático en el periodo de estudio y en la figura 5.1 se muestra su diagrama de caja correspondiente, estos valores fueron analizados realizando comparaciones entre el periodo de caudales observados y cada uno de los escenarios. Posteriormente se compararon los resultados de cada escenario con el fin de determinar comportamientos y singularidades en cada uno de los mismos.

### 5.4.1. Variación con respecto al escenario B1

Tabla 5.9: Variaciones en el escenario B1

	Actual	B1	Variación	Porcentaje
Qmin	0,0121	0,0060	0,0060	50,15
Q10	0,0177	0,0171	0,0005	3,03
Q50	0,0453	0,0447	0,0007	1,46
Q90	0,1723	0,1043	0,0680	39,49
Qmax	1,0693	0,3363	0,7330	68,55
Promedio	0,0799	0,0544	0,0255	31,89

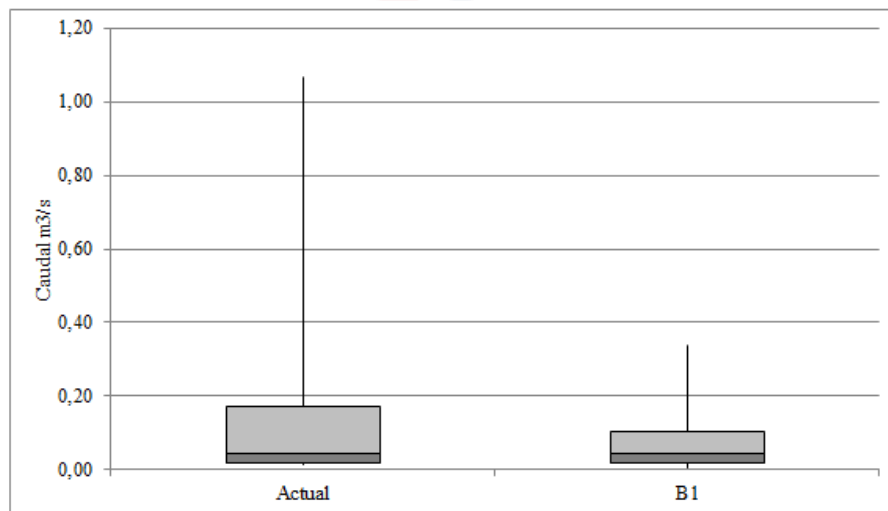


Figura 5.2: Diagramas de caja para los datos observados y el escenario B1

El escenario B1, como se explicó anteriormente, representa el caso de menor impacto. En la comparación con el escenario actual observamos que la mayor variación se produjo en el caudal mínimo, y en el máximo, lo que nos indica que para éste escenario tendremos una reducción en los caudales en los periodos de sequía y de crecida. Hay que notar que, aunque para estos dos valores la variación es alta en términos de porcentaje, para el caso del caudal mínimo es baja en términos de magnitud, mientras que en el caso del caudal máximo, se puede observar que hay una diferencia significativa entre el caudal observado actual y el máximo, pues este se reduciría en un 68,55 % dentro de 50 años.

Además, el Q90 y el Qpromedio presentan reducciones importantes aunque no tan altas como los dos parámetros anteriores, mientras que las variaciones en el Q10 y Q50 son mínimas, lo que nos indica que para estos dos casos, los caudales a la salida mantendrían un comportamiento similar al actual.

#### 5.4.2. Variación con respecto al escenario A1B

Tabla 5.10: Variación en el escenario A1B

	Observados	A1B	Variación	Porcentaje
Qmin	0,0121	0,0056	0,0065	53,79
Q10	0,0177	0,0152	0,0025	14,29
Q50	0,0453	0,0400	0,0053	11,72
Q90	0,1723	0,1070	0,0653	37,88
Qmax	1,0693	0,3991	0,6702	62,68
Promedio	0,0799	0,0528	0,0271	33,90

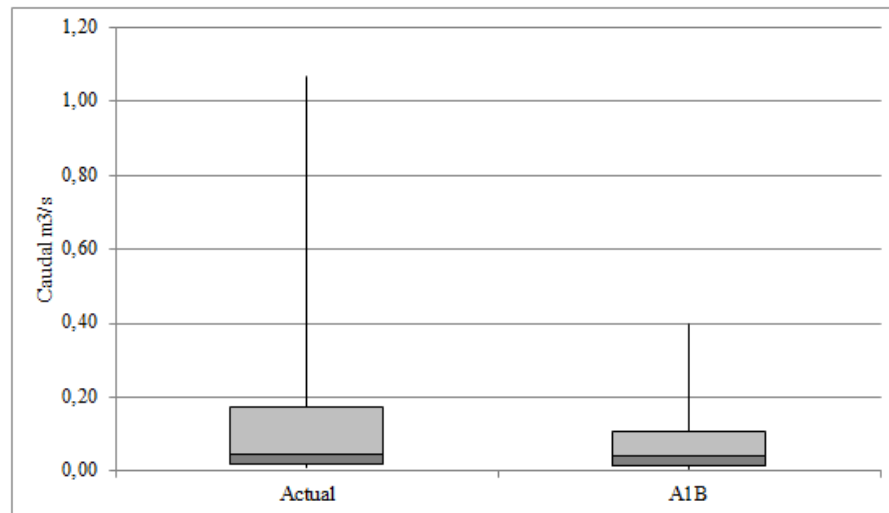


Figura 5.3: Diagramas de caja para el periodo observado y el escenario A1B

En el escenario A1B que tiene un comportamiento intermedio de emisiones, observamos que, al igual que para el caso de B1 los valores mínimo y máximo presentan las mayores variaciones, y de la misma manera, aunque el caudal mínimo

presenta una reducción del 53,79 % , la magnitud de esta variación es de 0,0065 m<sup>3</sup>/s, mientras que en el caso del caudal máximo, tenemos una reducción de 0,67 m<sup>3</sup>/s que corresponde a una disminución del 62,68 %.

Para el Q90 y el promedio se tienen variaciones del 37,88 % y 33,90 % respectivamente que son variaciones considerables si observamos su magnitud que es de 0,065 m<sup>3</sup>/s para el Q90 y de 0,027 m<sup>3</sup>/s para el caso de los caudales promedio.

Los caudales correspondientes al Q10 y Q50 son los que más estables se mantendrían, pues su variaciones son de 0,0025 m<sup>3</sup>/s y 0,0053 m<sup>3</sup>/s respectivamente. En cuanto a su variación relativa, se puede observar decrementos del 14,29 % para el Q10 y del 11,73 % para el Q50, siendo este el que se mantiene más estable para este escenario.

#### 5.4.3. Variación con respecto al escenario A2

Tabla 5.11: Variación en el escenario A2

	Actual	A2	Variación	Porcentaje
Qmin	0,0121	0,0054	0,0067	55,51
Q10	0,0177	0,0142	0,0034	19,44
Q50	0,0453	0,0388	0,0065	14,41
Q90	0,1723	0,1074	0,0649	37,64
Qmax	1,0693	0,4178	0,6515	60,93
Promedio	0,0799	0,0526	0,0274	34,23

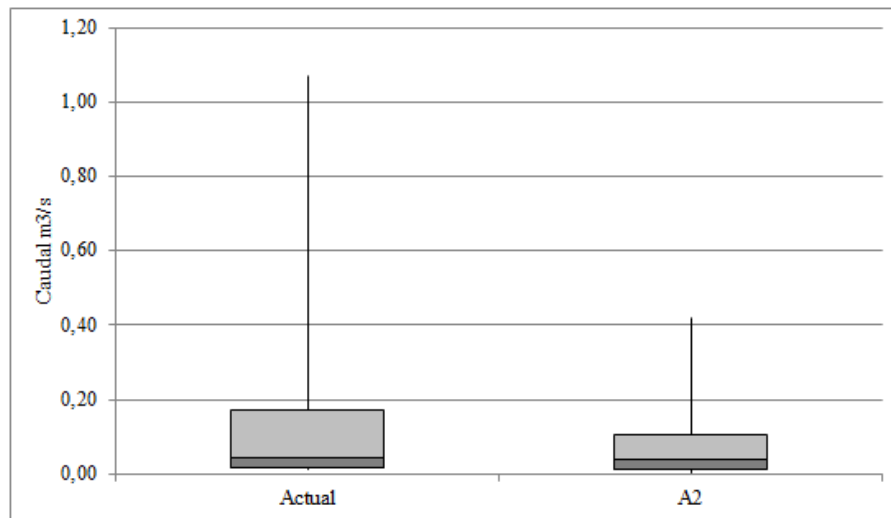


Figura 5.4: Diagrama de caja para el periodo observado y el escenario A2

El escenario A2 representa el caso menos favorable y con mayores emisiones. En éste podemos observar que para el  $Q_{min}$  y  $Q_{max}$  existió un decremento del 55,51 % y 60,93 % respectivamente con respecto a los valores observados, en el caso del caudal mínimo, se obtuvo una disminución de 0,0067 m<sup>3</sup>/s para el  $Q_{min}$  y de 0,65 m<sup>3</sup>/s para el  $Q_{max}$ , por lo que podemos notar que las variaciones en el caudal máximo tuvieron una magnitud mucho mayor que en el caso del  $Q_{min}$ .

El  $Q_{90}$  mostró un decremento de 37,64 % que es similar al promedio que disminuiría un 34,23 % con respecto al valor observado. La magnitud en la que se reduciría el  $Q_{90}$  es de 0,065 m<sup>3</sup>/s que es menor a la variación del promedio que presentó una disminución de 0,027 m<sup>3</sup>/s.

El  $Q_{10}$  y el  $Q_{50}$  presentaron en este caso variaciones más significativas que en los modelos anteriores, pues como se puede observar en la tabla 5.11 se produjeron reducciones de 0,0034 m<sup>3</sup>/s y 0,0065 m<sup>3</sup>/s respectivamente, que corresponden al 19,44 % para el  $Q_{10}$  y del 14,44 % para el  $Q_{50}$ .



#### 5.4.4. Comparación de las variaciones en los 3 escenarios con respecto al periodo actual

Tabla 5.12: Comparación de variaciones en los 3 escenarios

	Variación B1	Variación A1B	Variación A2
Qmin	0,0060	0,0065	0,0067
Q10	0,0005	0,0025	0,0034
Q50	0,0007	0,0053	0,0065
Q90	0,0680	0,0653	0,0649
Qmax	0,7330	0,6702	0,6515
Promedio	0,0255	0,0271	0,0274

Se debe notar que los caudales pico futuros que se obtuvieron son claramente menores que el Qmax actual, pues para los datos observados tenemos un Q90 de 0,172 m<sup>3</sup>/s y un Qmax 1,069 m<sup>3</sup>/s, mientras que para el escenario A2 se obtuvo Q90 y Qmax de 0,107 m<sup>3</sup>/s y Qmax de 0,418 m<sup>3</sup>/s. La diferencia fue mayor con el escenario A1B que presentó un Q90 de 0,107 m<sup>3</sup>/s y un Qmax de 0,399 m<sup>3</sup>/s. En el caso del escenario B1 luego de la modelización con series futuras, se obtuvo un Q90 de 0,104 m<sup>3</sup>/s y un Qmax de 0,33 m<sup>3</sup>/s

Se puede observar en la tabla 5.12 que el escenario A2 presentó las mayores variaciones futuras para el Qmin, Q10, Q50 y el promedio, mientras que para el Q90 y el Qmax fueron las menores. El escenario B1, mostró las menores variaciones para el caso del Qmin, Q10, Q50 y Qpromedio y las mayores para el Q90 y el Qmax. El escenario A1B siempre mantuvo un comportamiento intermedio.

Como resultado de este análisis podemos decir que en el caso menos favorable, es decir el escenario A2, los caudales a la salida de la cuenca presentaron un cambio en su comportamiento, con disminución en los caudales bajos, lo que nos indicaría que las sequías serían más agudas a las que se presentan actualmente.

Los caudales modelados presentaron un Q90 y Qmax mayores que los modelados, y que la variación en los caudales altos (Q90, Qmax) fue menor en el escenario A2 que en los escenarios B1 y A1B, podemos deducir que, para este escenario, se tendrían periodos de sequía y de crecida más intensos.

El análisis del escenario B1 nos mostró que la mayor variación se produjo en los caudales altos, siendo estos menores que en los otros escenarios. Con esto tendríamos menor caudal a la salida de la cuenca en los periodos de crecida.

Para los caudales bajos, la variación fue menor que en el escenario A2 y A1B y mucho menor para los caudales intermedios ( $Q_{50}$ ,  $Q_{promedio}$ ), por lo que para este escenario se tuvo una menor alteración en los flujos bajos y medios, que conservarían un comportamiento similar al observado, es decir las alteraciones en los caudales a la salida de la cuenca serían considerablemente menores para el escenario B1.

El escenario A1B presentó un comportamiento intermedio entre el A2 y el B1, como se puede observar, sus variaciones en los caudales bajos intermedios y altos se aproximan más a las del escenario A2, lo que nos daría como resultado que, de mantenerse un patrón de emisiones futuras similar a las de este escenario, tendríamos periodos de sequía y de crecida más intensos, aunque no tan altos como se vio en A2, hay que mostrar que los caudales promedio y  $Q_{50}$  también se tuvo variaciones más cercanas a las del escenario A2, por lo que este escenario también representaría un impacto en la cuenca Huagrahuma.

## **5.5. Análisis de sequías**

En este punto, se analizaron los periodos de sequía que se encontraron en el periodo actual y se los comparó con los periodos de sequía proyectados en los escenarios A2, A1B y B1. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

### 5.5.1. Sequías en el escenario A2

Tabla 5.13: Sequías en el escenario A2

Sequía	Actual	A2
Periodos de sequía	46	124
Promedio de días de sequía del escenario	2,75	1,14
Q75	2,76	1,28
Q90	4,85	3,15
Máximo periodo	10,50	10,51

Como se puede observar en la tabla 5.13 en el periodo observado se presentaron 46 periodos de sequía, el periodo fue de 2,75 días lo cual está muy cerca de Q75 que es igual a 2,76 días, el Q90 es de 4,85 días y el periodo máximo tuvo 10,50 días.

En el caso del escenario A2, se contabilizaron 124 periodos de sequía, superando por mucho a los contabilizados en el periodo de datos observados. El promedio de días de sequía también presentó una reducción, pues fue de 1,14 días, como se puede observar en la tabla 5.13 el caudal promedio mostró valores similares al Q75. Es a partir del Q90 cuando empezó a marcarse un incremento en la duración de los periodos secos hasta llegar a un periodo máximo de 10,51 días, que es igual al máximo periodo registrado actualmente.

Tabla 5.14: Comparación de sequías entre periodo observado y escenario A2

	Actual (Días)	A2 (Días)	Diferencia
Variación Max-Q75	7,74	9,23	1,49
Variación Max-Q90	5,65	7,36	1,71

Si observamos la tabla 5.14 podemos notar que la variación entre el máximo y el Q75 fue de 7,74 días para los datos observados y de 9,23 días para el escenario A2, obteniéndose un incremento en esta variación de 1,5 días para los datos proyectados.

En el caso del cambio entre el máximo y el Q90, se obtuvo que para el periodo observado éste fue de 5,65 días y de 7,36 días para el escenario A2, lo que nos muestra un incremento de 1,71 días en la diferencia entre estas dos variaciones.

### 5.5.2. Sequías en el escenario A1B

Tabla 5.15: Sequías en el escenario A1B

Sequía	Actual	A1B
Periodos de sequía	46	127
Promedio de días de sequía del escenario	2,75	1,03
Q75	2,76	1,22
Q90	4,85	2,82
Máximo periodo	10,50	9,11

En el escenario A1B, se registraron 127 periodos de sequía, con un promedio de 1,03 días de duración, el Q75 fue de 1,22, el Q90 de 2,82 días y el máximo de 9,11 días. Aunque los periodos de sequía son más que para los datos observados, notamos también una disminución en los demás parámetros, lo que nos indica una disminución en la duración de los periodos secos.

Tabla 5.16: Periodos de sequía en el periodo observado y escenario A1B

	Actual (Días)	A1B (Días)	Diferencia (Días)
Variación Max-Q75	7,74	7,89	0,15
Variación Max-Q90	5,65	6,29	0,64

Se puede notar en la tabla 5.16 que la variación entre el máximo y el Q75 fue de 7,74 días para los datos observados y de 7,89 días para el escenario A1B, lo que nos indica una variación similar, aunque los periodos de sequía sí presenten diferencias en su duración.

### 5.5.3. Sequías en el escenario B1

Tabla 5.17: Sequías en el escenario B1

Sequía	Actual	B1
Periodos de sequía	46	119
Promedio de días de sequía del escenario	2,75	0,99
Q75	2,76	1,23
Q90	4,85	2,81
Máximo periodo	10,50	8,04

Los periodos de sequía que se contabilizaron para el escenario A1b fueron 119, la duración promedio de los días de sequía es de 0,99, el Q75 de 1,23 días, el Q90 de 2,81 días y el periodo máximo fue de 8,04 días.

Tabla 5.18: Comparación de sequías entre periodo observado y escenario B1

	Actual (Días)	B1 (Días)	Diferencia (Días)
Variación Max-Q75	7,74	6,82	-0,93
Variación Max-Q90	5,65	5,24	-0,41

Las variación obtenida entre el máximo y el Q75 fue de 6,82 días, y entre el máximo y el Q90 fue de 5,24 días, lo que nos indica que en el escenario B1 hay una reducción importante en la duración de los periodos de sequía, se puede observar que la diferencia entre el periodo de datos observados y el escenario B1 se redujo en 0,93 días con respecto a la variación entre el máximo periodo y el Q75, y también, en el caso de los máximos se presentó una reducción de 0,41 días, lo que nos sugiere que en este escenario los periodos de sequía serán más uniformes que en el periodo de caudales observados así como en el escenario A2 y A1B.

#### 5.5.4. Comparación de las sequías en los 3 escenarios

Tabla 5.19: Sequías en los escenarios A2, A1B, B1 y en el periodo observado

	A2	A1B	B1	Actual
Periodos de sequía (Días)	124	127	119	46
Promedio de días de sequía del escenario (Días)	1,14	1,03	0,99	2,75
Q75 (Días)	1,28	1,22	1,23	2,76
Q90 (Días)	3,15	2,82	2,81	4,85
Máximo periodo (Días)	10,51	9,11	8,04	10,50

Se pudo observar que en los distintos escenarios se tiene un número similar de periodos de sequía, siendo el A1B el que tiene mayor cantidad con 127.

La duración promedio fue mayor en el escenario A2 con 1,14 días, aunque estas fueron similares para los 3 escenarios. Lo mismo sucedió para el caso del Q75, donde el mayor corresponde al escenario A2, sin embargo guarda cierta similitud con los escenarios A1B y B1.

En el Q90 se pudo observar que los escenarios A1B y B1 presentaron valores casi iguales con 2,82 días y 2,81 días respectivamente. Sin embargo en el escenario A2 se encontró un valor de 3,15 días, lo que nos indica que para este, los periodos de sequía altos, tendrían duraciones mayores que en los escenarios A1B y B1.

Para los periodos máximos, se encontraron claras diferencias en los 3 escenarios, siendo el A2 una vez más el que tiene el mayor valor con 10,51 días, seguido del A1B con lo que nos indicaría que las emisiones de CO<sub>2</sub> podrían tener una relación directamente proporcional con la duración de los periodos de sequía máximos en la cuenca estudiada.

## Capítulo 6

---

# Conclusiones, observaciones y recomendaciones

---

### 6.1. Conclusiones

El presente trabajo fue realizado utilizando la herramienta de la modelización hidrológica de manera que se pueda captar las dinámicas del flujo en la cuenca Huagrahuma. El modelo utilizado VHM, fue calibrado y validado con series de caudales, precipitación y evapotranspiración agregadas en una escala horaria, las mismas que fueron obtenidas luego de un proceso de recopilación y control de calidad.

Esto ayudó a la estimación de caudales futuros en diferentes escenarios de cambio climático. Con base en este procedimiento se pudo estimar el impacto que el cambio climático podría representar en los caudales de la cuenca de estudio.

La modelización con series de precipitación y evapotranspiración comprendidas para los escenarios de cambio climático A2, A1B y B1, nos permitió realizar comparaciones del comportamiento que podría presentarse en la cuenca en los casos más desfavorable, intermedio y más favorable. Estas proyecciones indican que los caudales máximos a la salida de la cuenca podrían variar de una forma directamente proporcional a las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, pues para el caso de mayores emisiones, en el escenario A2 se obtuvo los caudales máximos más altos y para el caso más favorable, en el escenario B1 los caudales máximos fueron menores.

Los caudales mínimos también presentaron una relación con el nivel de emi-

siones de CO<sub>2</sub>, pero en este caso fueron inversamente proporcionales, es decir que para el escenario A2, los caudales mínimo fueron menores que en el caso del escenario A1B y del escenario B1, que tuvo el mayor caudal mínimo.

Con base en esto se pudo concluir que, en un escenario con mayor cantidad de emisiones, tendríamos periodos de sequía y crecida más intensos. Mientras que de reducirse las emisiones hasta un escenario intermedio, como el A1B, la diferencia entre caudales altos y bajos se reduciría a niveles similares a los actuales. Si las emisiones a la atmosfera presentan una reducción en los próximos años, como en el escenario B1, tendremos caudales altos menores y caudales mínimos mayores a los actuales.

Analizando los resultados se determinó que el cambio climático tendría un efecto en los caudales pico y en los niveles de saturación. Esto se dedujo en función de que, los periodos de sequía futuros son más frecuentes que en el periodo actual pero tienen una menor duración. Esto, sumado a una disminución de los caudales máximos en los escenario futuros, nos indicó que con la presencia frecuente de sequías, los niveles máximos de saturación no están siendo alcanzados, lo que influye en los caudales máximos de la cuenca. En el anexo 6.6 se puede evidenciar esto gráficamente.

Con esto podemos deducir que, el cambio climático tendría una incidencia en el almacenamiento de agua, pues en términos de entrada y de salida, las variaciones se presentaron en la capacidad del ecosistema para almacenarla en periodos húmedos y liberarla en periodos secos.

En cuanto a los resultados obtenidos en el análisis de los periodos de sequía se concluyó que el cambio climático podría tener una incidencia importante en los mismos. Se observó que los periodos de sequía fueron más frecuentes en el futuro y que la duración de los mismos guardo una relación directamente proporcional con las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, siendo una vez más escenario con mayor cantidad de emisiones el que más impactos genera en términos de disponibilidad de agua a la cuenca estudiada.

En una forma más global, se concluyó que el cambio climático puede tener incidencia en los caudales de la cuenca Huagrahuma, pues en cada análisis de resultados se pudo observar que los parámetros determinados para cada escenario,



siempre fueron más desfavorables en el A2, que es el que modela un futuro con mayores emisiones que las actuales, mientras que en el escenario B1 que modela un futuro con menores emisiones se observaron resultados más favorables, y además en el escenario A1B los resultados fueron en la mayoría de los casos intermedios entre los dos escenarios anteriores.

## **6.2. Observaciones**

Es importante recalcar que los modelos hidrológicos presentan un nivel incertidumbre en sus resultados, que siempre serán aproximados a la realidad. A pesar de la buena calidad de datos facilitados por el PROMAS, los resultados son solo estimaciones que tratan de establecer relaciones entre el comportamiento presente y futuro de la cuenca Huagrahuma, en función de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, principales causantes del cambio climático. Sin embargo, es una herramienta muy importante, que permite el desarrollo de estrategias preventivas y toma de decisiones.

La determinación indirecta de ciertos parámetros como la evapotranspiración siempre genera una incertidumbre, pues para esta, existen muchos métodos que pueden presentar valores con ciertas diferencias entre sí y su precisión puede aumentar o disminuir en función de la cantidad de parámetros que considere y los que se tienen observados en campo.

La eficiencia del modelo puede influir en la precisión de sus resultados, sin embargo con una eficiencia entre aceptable y buena, se puede analizar los datos y recolectar información suficiente que nos permite establecer conclusiones.

Hay que enfatizar que el modelo podría sobre estimar la capacidad de retención de agua en el suelo. Adicionalmente, el impacto de cambio climático ha sido analizado únicamente desde el punto de vista de cambios en variables climáticas. Sin embargo, existen características de la cuenca, como las grandes propiedades de almacenamiento de agua del suelo, que pueden ser alteradas y por ende, se recomienda la implementación de mayor investigación sobre este tema a futuro.

Hay que considerar que el comportamiento de los caudales en la cuenca estudiada no solo puede estar influenciado por el cambio climático, esto representa



una dificultad en estudios de este tipo que puede ser solucionada mediante la realización de otros estudios en el futuro.

### **6.3. Recomendaciones**

La importancia que ha representado la modelación hidrológica para la realización de este y muchos estudios, hace que se considere necesaria su aplicación a otras cuencas de páramo, esto con el fin de incrementar el estado del arte en términos de modelización hidrológica en este ecosistema tan importante para la disponibilidad de agua para el consumo humano, industria y para la generación de energía.

Sería importante la implementación de estudios similares al presente ocupando otros modelos hidrológicos, con el fin de realizar comparaciones entre los resultados. Con esto se podría evaluar la eficiencia de varios modelos y determinar de resultados más precisos.

Podría recomendarse la realización de estudios que analicen el impacto que pueden tener otros factores como el cambio en los usos del suelo, degradación por actividades humanas, entre otros, en los caudales de las cuencas de páramo. Para determinar que factor es el de mayor incidencia en los mismos.

Estudiar más a fondo las cuencas de páramo Andino es muy importante desde el punto de vista de la ingeniería civil, ya que con un mayor conocimiento se podrá mejorar su gestión y mantenimiento.

Es importante para el ingeniero conocer los caudales con los que cuenta a la salida de una cuenca, con el fin de determinar la capacidad de abastecimiento que tiene la misma y a qué porcentaje de la población puede abastecer. De la misma manera, es importante analizar que la tendencia creciente de la población, sumada a una reducción en los caudales a la salida de una fuente de agua, representan un problema de disponibilidad de agua que puede llegar a presentarse en el futuro. Por lo que estudios como estos ayudarían al ingeniero a determinar estrategias para la prevención y para la búsqueda de otras fuentes de agua para abastecer a la población.

---

## Anexos

---

### 6.4. WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool

Haciendo uso de técnicas numéricas digitales de filtrado, podemos dividir una serie de tiempo de precipitación-escorrentía en sus subflujos [42], los cuales se definen como:

- Flujo base: Es el caudal conformado por el agua que fluye desde el almacenamiento del agua subterránea hacia los cauces. Ocurre cuando los cauces captan agua subterránea, sea esta proveniente del nivel freático o de acuíferos más profundos.
- Interflujo: Es el caudal relativamente rápido que va hacia el cauce y se produce justo debajo de la superficie. También se lo conoce como flujo subsuperficial.
- Flujo superficial: Es el flujo más rápido que discurre hacia el cauce por la superficie del terreno, se presenta cuando el suelo se ha saturado por efectos como un evento de precipitación de alta intensidad.

Su interpretación física está basada en el modelo de reservorio lineal, que se describe a continuación:

### 6.4.1. Modelo del reservorio lineal

En un modelo de reservorio lineal, el flujo a la salida  $b(t)$  es dependiente del flujo a la entrada  $q(t)$  mediante la siguiente ecuación 6.1 [42]:

$$b(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right)b(t-1) + (1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right))\left(\frac{q(t-1) + q(t)}{2}\right) \quad (6.1)$$

Usando:

$$\alpha = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) \quad (6.2)$$

la ecuación 6.1 puede ser simplificada, obteniendo:

$$b(t) = \alpha(t-1) + (1 - \alpha)\left(\frac{q(t-1) + q(t)}{2}\right) \quad (6.3)$$

El parámetro  $k$  del modelo de reservorio lineal, es llamado “constante del reservorio” o “tiempo de recesión”. El valor de  $k$  es igual a la duración  $dt$  del intervalo de tiempo  $[t-1, t]$  [42], como se muestra en la figura 6.1 que fue tomada y adaptada de la referencia bibliográfica [42] por Willems et al 2003.

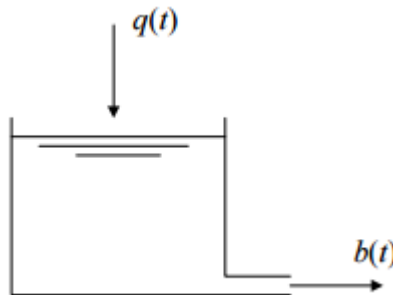


Figura 6.1: Series de entrada y salida de un modelo de reservorio lineal

El tiempo de recesión  $k$  es igual al tiempo en el que el flujo es reducido durante los periodos secos a la fracción  $\exp(-1)=0,37$  de su descarga original. Para periodos

con entrada  $q(t)=0$  la salida del reservorio decrece de manera exponencial:

$$b(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right)b(t-1) = \alpha b(t-1) \quad (6.4)$$

Cuando la descarga a la salida es igual a  $b(0)$  para un tiempo  $t=0$ , la descarga en el tiempo  $t=k$  será igual a:

$$b(k) = \exp(-1)b(0) \quad (6.5)$$

La constante de recesión está relacionada con el “tiempo de concentración” del sistema a modelar, la misma está definida como el tiempo que necesita el agua para llegar a la salida, viajando desde el punto más lejano de la captación [49, 42]. Mientras más largo sea el sistema, o más obstaculizado esté el flujo, mayor será dicho tiempo de concentración y mayor será el intervalo sobre el cual los valores de entrada pueden influenciar las salidas del modelo [42]. Esto se ilustra gráficamente en la figura 6.2 tomada de la referencia bibliográfica [42] por Willems et al en el año 2003.

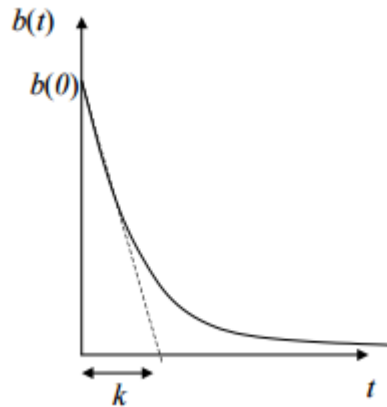


Figura 6.2: Recesión exponencial de las salidas del reservorio lineal durante periodos con cero flujo de entrada

- Separación de las descargas: Con base en el filtro, la serie total de caudales se puede dividir en una serie de sus componentes (Flujo base, interflujo y flujo superficial). El proceso de separación está basado en la diferencia en



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

---

orden de magnitud de la constante de recesión de los subflujos [42]. El flujo base se separa primero de la descarga total de precipitación esorrentía, seguido del interflujo que es separado de la descarga combinada del flujo superficial y éste.

Las constantes de recesión de los subflujos se pueden calibrar como el valor promedio de la inversa de la pendiente en los periodos de recesión [42]. Donde “s” es el número de intervalos considerados durante los periodos de recesión, la constante de recesión puede ser calculada mediante la ecuación 6.6:

$$\frac{en(q(t-s)) - en(q(t))}{s} = \frac{1}{k} \quad (6.6)$$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

Tabla 6.1: Escenarios y modelos globales usados en la modelización

Escenario A2	Escenario A1B	Escenario B1
bccr_bcm2_0_run1	bccr_bcm2_0_run1	bccr_bcm2_0_run1
cnrm_cm3_run1	cnrm_cm3_run1	cnrm_cm3_run1
miroc3_2_medres_run1	giss_aom_run1	giss_aom_run1
miroc3_2_medres_run2	miroc3_2_hires_run1	miroc3_2_hires_run1
mpi_echam5_run1	miroc3_2_medres_run1	miroc3_2_medres_run1
cccma_cgcm3_1_run1	miroc3_2_medres_run2	miroc3_2_medres_run2
cccma_cgcm3_1_run2	mpi_echam5_run4	mpi_echam5_run1
cccma_cgcm3_1_run3	cccma_cgcm3_1_run1	cccma_cgcm3_1_run1
csiro_mk3_0_run1	cccma_cgcm3_1_run2	cccma_cgcm3_1_run2
csiro_mk3_5_run1	cccma_cgcm3_1_run3	cccma_cgcm3_1_run3
gfdl_cm2_0_run1	cccma_cgcm3_1_t63_run1	cccma_cgcm3_1_t63_run1
giss_model_e_r_run1	csiro_mk3_0_run1	csiro_mk3_0_run1
mri_cgcm2_3_2a_run1	csiro_mk3_5_run1	csiro_mk3_5_run1
mri_cgcm2_3_2a_run2	gfdl_cm2_0_run1	gfdl_cm2_0_run1
mri_cgcm2_3_2a_run3	giss_model_e_r_run1	giss_model_e_r_run1
mri_cgcm2_3_2a_run4	iap_fgoals1_0_g_run1	iap_fgoals1_0_g_run1
mri_cgcm2_3_2a_run5	iap_fgoals1_0_g_run2	iap_fgoals1_0_g_run2
ncar_ccsm3_0_run1	iap_fgoals1_0_g_run3	iap_fgoals1_0_g_run3
ncar_ccsm3_0_run3	mri_cgcm2_3_2a_run1	mri_cgcm2_3_2a_run1
ncar_ccsm3_0_run5	mri_cgcm2_3_2a_run2	mri_cgcm2_3_2a_run2
ncar_pcm1_run1	mri_cgcm2_3_2a_run3	mri_cgcm2_3_2a_run3
ingv_echam4_run1	mri_cgcm2_3_2a_run4	mri_cgcm2_3_2a_run4
ipsl_cm4_run1	mri_cgcm2_3_2a_run5	mri_cgcm2_3_2a_run5
miub_echo_g_run1	ncar_ccsm3_0_run3	ncar_ccsm3_0_run6
miub_echo_g_run2	ncar_ccsm3_0_run5	ncar_ccsm3_0_run7
miub_echo_g_run3	ncar_ccsm3_0_run6	ncar_ccsm3_0_run8
PRECIS_echam	ncar_ccsm3_0_run7	ncar_pcm1_run1
	ncar_ccsm3_0_run8	ncar_pcm1_run2
	ncar_pcm1_run1	ipsl_cm4_run1
	ingv_echam4_run1	miub_echo_g_run1
	ipsl_cm4_run1	miub_echo_g_run2
	miub_echo_g_run1	miub_echo_g_run3
	miub_echo_g_run2	
	miub_echo_g_run3	

Tabla 6.2: Parámetros estadísticos para cada modelo climático del escenario A2

	Min	Q10	Q50	Q90	Max	Promedio
bccr_bcm2_0_run1	0,004	0,009	0,034	0,079	0,255	0,041
cnrm_cm3_run1	0,008	0,016	0,040	0,097	0,297	0,051
miroc3_2_medres_run1	0,003	0,006	0,023	0,188	0,679	0,063
miroc3_2_medres_run2	0,004	0,008	0,028	0,182	1,312	0,074
mpi_echam5_run1	0,004	0,009	0,027	0,214	1,397	0,082
cccma_cgcm3_1_run1	0,008	0,021	0,051	0,119	0,363	0,063
cccma_cgcm3_1_run2	0,009	0,025	0,062	0,136	0,395	0,073
cccma_cgcm3_1_run3	0,010	0,023	0,052	0,120	0,416	0,064
csiro_mk3_0_run1	0,008	0,023	0,057	0,124	0,336	0,067
csiro_mk3_5_run1	0,008	0,022	0,050	0,115	0,350	0,061
gfdl_cm2_0_run1	0,004	0,014	0,039	0,093	0,237	0,047
giss_model_e_r_run1	0,002	0,008	0,022	0,064	0,248	0,031
mri_cgcm2_3_2a_run1	0,002	0,008	0,023	0,065	0,247	0,032
mri_cgcm2_3_2a_run2	0,003	0,009	0,030	0,080	0,279	0,039
mri_cgcm2_3_2a_run3	0,004	0,015	0,047	0,111	0,545	0,058
mri_cgcm2_3_2a_run4	0,004	0,013	0,041	0,101	0,526	0,051
mri_cgcm2_3_2a_run5	0,001	0,008	0,032	0,083	0,251	0,040
ncar_ccsm3_0_run1	0,003	0,009	0,027	0,073	0,241	0,036
ncar_ccsm3_0_run5	0,004	0,012	0,039	0,120	0,587	0,055
ncar_pcm1_run1	0,005	0,016	0,038	0,083	0,213	0,045
ingv_echam4_run1	0,009	0,019	0,051	0,109	0,267	0,060
ipsl_cm4_run1	0,003	0,009	0,028	0,074	0,240	0,036
miub_echo_g_run1	0,009	0,021	0,047	0,097	0,342	0,055
miub_echo_g_run2	0,007	0,018	0,044	0,092	0,248	0,050
miub_echo_g_run3	0,008	0,018	0,045	0,098	0,294	0,053
PRECIS_echam	0,006	0,013	0,032	0,076	0,299	0,039



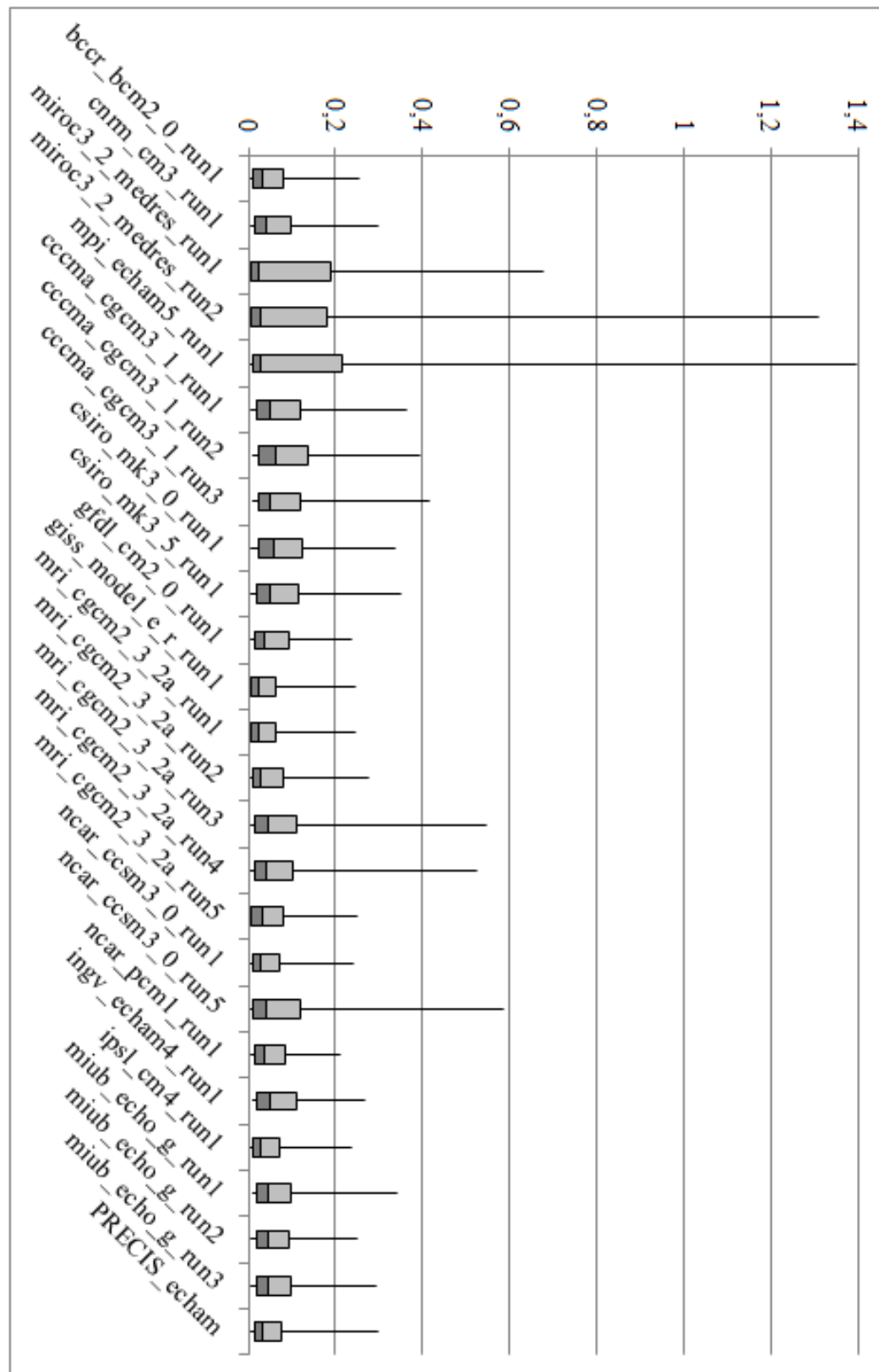


Figura 6.3: Diagramas de caja para los modelos climáticos del escenario A2

Tabla 6.3: Periodos de sequía para los modelos del escenario A2

Modelo	# de Periodos	Qmax	Q75	Q90	Qmedio
bccr_bcm2_0_run1	128	11,38	1,08	4,02	1,35
cnrm_cm3_run1	147	5,08	1,04	2,51	0,83
miroc3_2_medres_run1	154	14,50	1,52	4,46	1,63
miroc3_2_medres_run2	158	11,58	1,38	3,29	1,38
mpi_echam5_run1	188	11,50	1,13	2,67	1,17
cccma_cgcm3_1_run1	94	4,42	1,09	2,25	0,78
cccma_cgcm3_1_run2	45	3,88	1,46	2,75	1,00
cccma_cgcm3_1_run3	67	3,96	1,38	2,38	0,86
csiro_mk3_0_run1	57	3,75	1,58	2,38	0,98
csiro_mk3_5_run1	76	4,38	1,09	2,35	0,79
gfdl_cm2_0_run1	133	10,67	1,19	2,63	1,00
giss_model_e_r_run1	147	19,88	1,58	5,53	1,74
mri_cgcm2_3_2a_run1	149	16,58	1,38	5,42	1,71
mri_cgcm2_3_2a_run2	140	19,29	0,99	3,72	1,46
mri_cgcm2_3_2a_run3	112	10,83	1,34	2,73	1,04
mri_cgcm2_3_2a_run4	120	18,79	1,38	2,95	1,18
mri_cgcm2_3_2a_run5	112	24,88	1,82	4,75	1,69
ncar_ccsm3_0_run1	141	19,25	1,69	3,93	1,55
ncar_ccsm3_0_run5	131	14,29	1,29	3,43	1,20
ncar_pcm1_run1	158	5,46	1,00	2,35	0,83
ingv_echam4_run1	88	4,54	1,28	2,42	0,87
ipsl_cm4_run1	187	13,79	1,00	3,08	1,11
miub_echo_g_run1	84	4,08	1,17	2,38	0,83
miub_echo_g_run2	116	4,71	1,27	2,48	0,90
miub_echo_g_run3	111	5,04	1,00	2,52	0,82
PRECIS_echam	190	6,71	1,05	2,57	0,84

Tabla 6.4: Parámetros estadísticos para cada modelo climático del escenario A1B

	Min	Q10	Q50	Q90	Max	Promedio
bccr_bcm2_0_run1	0,008	0,016	0,039	0,091	0,247	0,048
cnrm_cm3_run1	0,005	0,011	0,036	0,174	0,739	0,068
giss_aom_run1	0,005	0,011	0,032	0,176	0,925	0,070
miroc3_2_hires_run1	0,004	0,010	0,033	0,148	0,562	0,060
miroc3_2_medres_run1	0,003	0,009	0,028	0,171	0,625	0,061
miroc3_2_medres_run2	0,004	0,009	0,031	0,141	0,924	0,061
mpi_echam5_run4	0,008	0,021	0,054	0,122	0,350	0,065
cccma_cgcm3_1_run1	0,007	0,021	0,057	0,131	0,424	0,069
cccma_cgcm3_1_run2	0,010	0,021	0,048	0,113	0,350	0,060
cccma_cgcm3_1_run3	0,007	0,025	0,063	0,136	0,363	0,074
cccma_cgcm3_1_t63_run1	0,004	0,019	0,049	0,115	0,354	0,060
csiro_mk3_0_run1	0,006	0,016	0,038	0,087	0,251	0,046
csiro_mk3_5_run1	0,002	0,008	0,025	0,074	0,281	0,035
gfdl_cm2_0_run1	0,002	0,009	0,027	0,077	0,278	0,036
giss_model_e_r_run1	0,002	0,008	0,028	0,071	0,239	0,035
iap_fgoals1_0_g_run1	0,006	0,017	0,049	0,115	0,761	0,062
iap_fgoals1_0_g_run2	0,006	0,015	0,043	0,100	0,382	0,052
iap_fgoals1_0_g_run3	0,001	0,014	0,037	0,088	0,547	0,047
mri_cgcm2_3_2a_run1	0,003	0,009	0,027	0,082	0,321	0,038
mri_cgcm2_3_2a_run2	0,003	0,007	0,022	0,066	0,238	0,031
mri_cgcm2_3_2a_run3	0,007	0,022	0,051	0,109	0,272	0,059
mri_cgcm2_3_2a_run4	0,008	0,023	0,052	0,111	0,284	0,060
mri_cgcm2_3_2a_run5	0,007	0,019	0,046	0,098	0,264	0,054
ncar_ccsm3_0_run5	0,008	0,020	0,048	0,103	0,280	0,056
ncar_ccsm3_0_run6	0,003	0,011	0,038	0,123	0,569	0,055
ncar_ccsm3_0_run7	0,006	0,019	0,048	0,118	0,446	0,062
ncar_ccsm3_0_run8	0,007	0,018	0,044	0,096	0,252	0,052
ncar_pcm1_run1	0,004	0,012	0,030	0,068	0,298	0,036
ingv_echam4_run1	0,006	0,012	0,033	0,075	0,282	0,039
ipsl_cm4_run1	0,009	0,020	0,043	0,092	0,286	0,051
miub_echo_g_run1	0,007	0,019	0,046	0,098	0,289	0,054
miub_echo_g_run2	0,008	0,018	0,043	0,091	0,289	0,050
miub_echo_g_run3	0,005	0,014	0,033	0,074	0,199	0,039

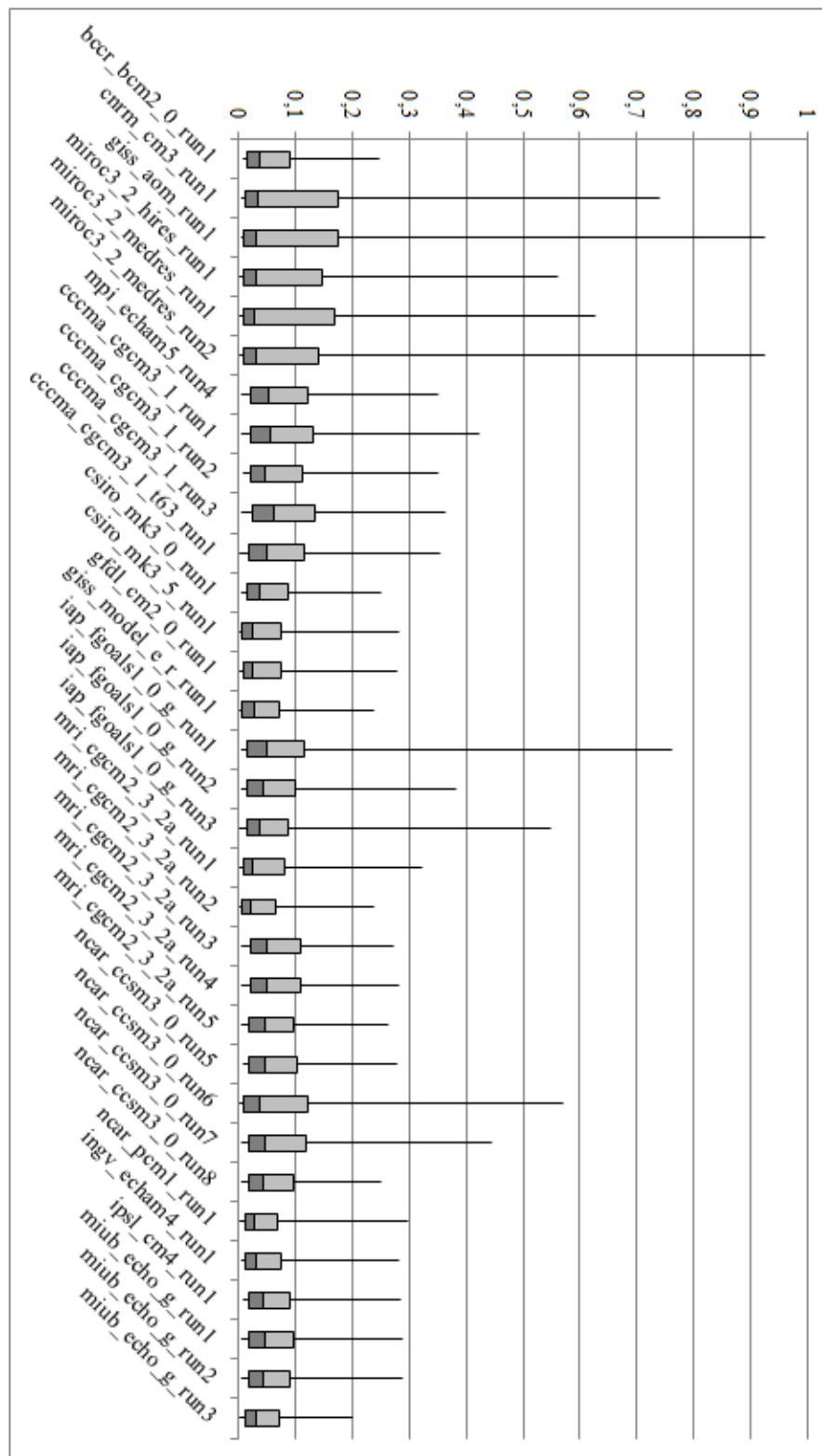


Figura 6.4: Diagramas de caja para los modelos climáticos del escenario A1B

Tabla 6.5: Periodos de sequía para los modelos del escenario A1B

Modelo	# de Periodos	Qmax	Q75	Q90	Qmedio
bccr_bcm2_0_run1	155	7,29	0,92	2,52	0,82
cnrm_cm3_run1	178	9,79	1,04	2,33	0,90
giss_aom_run1	202	7,79	0,96	2,38	0,92
miroc3_2_hires_run1	176	7,67	1,13	2,58	1,02
miroc3_2_medres_run1	197	10,00	1,13	2,68	1,08
miroc3_2_medres_run2	170	11,00	1,17	2,61	1,18
mpi_echam5_run4	71	6,38	1,25	2,33	0,89
cccma_cgcm3_1_run1	58	5,63	1,58	3,21	1,13
cccma_cgcm3_1_run2	72	3,96	1,41	2,43	0,95
cccma_cgcm3_1_run3	49	3,79	1,44	2,33	0,89
cccma_cgcm3_1_t63_run1	81	8,71	1,42	2,71	1,01
csiro_mk3_0_run1	130	5,46	1,47	2,62	0,97
csiro_mk3_5_run1	156	16,88	1,04	4,43	1,48
gfdl_cm2_0_run1	142	23,25	1,04	3,95	1,54
giss_model_e_r_run1	129	22,79	1,69	5,04	1,66
iap_fgoals1_0_g_run1	119	5,33	1,08	2,38	0,79
iap_fgoals1_0_g_run2	129	5,33	1,29	2,58	0,93
iap_fgoals1_0_g_run3	120	19,92	1,34	2,58	1,09
mri_cgcm2_3_2a_run1	138	20,63	1,76	3,95	1,59
mri_cgcm2_3_2a_run2	156	21,25	1,36	4,72	1,58
mri_cgcm2_3_2a_run3	76	3,75	1,17	2,30	0,80
mri_cgcm2_3_2a_run4	63	3,67	1,42	2,48	0,87
mri_cgcm2_3_2a_run5	103	5,00	1,13	2,19	0,83
ncar_ccsm3_0_run5	88	4,13	1,33	2,38	0,86
ncar_ccsm3_0_run6	127	12,75	1,25	3,33	1,27
ncar_ccsm3_0_run7	111	4,17	0,83	2,37	0,77
ncar_ccsm3_0_run8	116	4,88	1,29	2,35	0,84
ncar_pcm1_run1	200	10,83	1,16	2,75	0,94
ingv_echam4_run1	187	6,63	1,08	2,67	0,95
ipsl_cm4_run1	108	4,63	0,99	2,34	0,76
miub_echo_g_run1	101	4,79	1,08	2,38	0,85
miub_echo_g_run2	107	5,08	0,92	2,43	0,82
miub_echo_g_run3	170	7,42	1,08	2,83	0,94

Tabla 6.6: Parámetros estadísticos para cada modelo climático del escenario B1

	Min	Q10	Q50	Q90	Max	Promedio
bccr_bcm2_0_run1	0,008	0,018	0,047	0,105	0,258	0,056
cnrm_cm3_run1	0,006	0,013	0,036	0,095	0,282	0,046
giss_aom_run1	0,005	0,012	0,037	0,116	0,421	0,053
miroc3_2_hires_run1	0,005	0,011	0,032	0,127	0,578	0,054
miroc3_2_medres_run1	0,005	0,012	0,034	0,099	0,326	0,047
miroc3_2_medres_run2	0,008	0,021	0,051	0,120	0,334	0,062
mpi_echam5_run1	0,008	0,031	0,078	0,167	0,450	0,091
ccma_cgcm3_1_run1	0,005	0,041	0,110	0,219	0,521	0,123
ccma_cgcm3_1_run2	0,007	0,024	0,058	0,122	0,310	0,067
ccma_cgcm3_1_run3	0,004	0,018	0,043	0,101	0,311	0,054
ccma_cgcm3_1_t63_run1	0,006	0,015	0,042	0,099	0,269	0,051
csiro_mk3_0_run1	0,003	0,010	0,029	0,077	0,262	0,039
csiro_mk3_5_run1	0,003	0,009	0,024	0,066	0,245	0,032
gfdl_cm2_0_run1	0,003	0,009	0,027	0,071	0,267	0,035
giss_model_e_r_run1	0,006	0,016	0,048	0,112	0,412	0,058
iap_fgoals1_0_g_run1	0,006	0,019	0,047	0,105	0,529	0,056
iap_fgoals1_0_g_run2	0,002	0,013	0,035	0,084	0,432	0,044
iap_fgoals1_0_g_run3	0,004	0,010	0,033	0,080	0,272	0,041
mri_cgcm2_3_2a_run1	0,008	0,022	0,051	0,108	0,272	0,060
mri_cgcm2_3_2a_run2	0,007	0,022	0,049	0,107	0,283	0,058
mri_cgcm2_3_2a_run3	0,009	0,024	0,056	0,115	0,293	0,064
mri_cgcm2_3_2a_run5	0,009	0,020	0,048	0,106	0,274	0,057
ncar_ccsm3_0_run6	0,003	0,013	0,043	0,112	0,394	0,053
ncar_ccsm3_0_run7	0,007	0,018	0,052	0,126	0,422	0,065
ncar_ccsm3_0_run8	0,006	0,017	0,043	0,090	0,254	0,050
ncar_pcm1_run1	0,006	0,012	0,030	0,067	0,283	0,036
ncar_pcm1_run2	0,006	0,014	0,036	0,082	0,304	0,043
ipsl_cm4_run1	0,009	0,019	0,046	0,093	0,255	0,053
miub_echo_g_run1	0,008	0,020	0,047	0,097	0,274	0,054
miub_echo_g_run2	0,008	0,017	0,044	0,093	0,377	0,051
miub_echo_g_run3	0,005	0,012	0,031	0,073	0,258	0,037

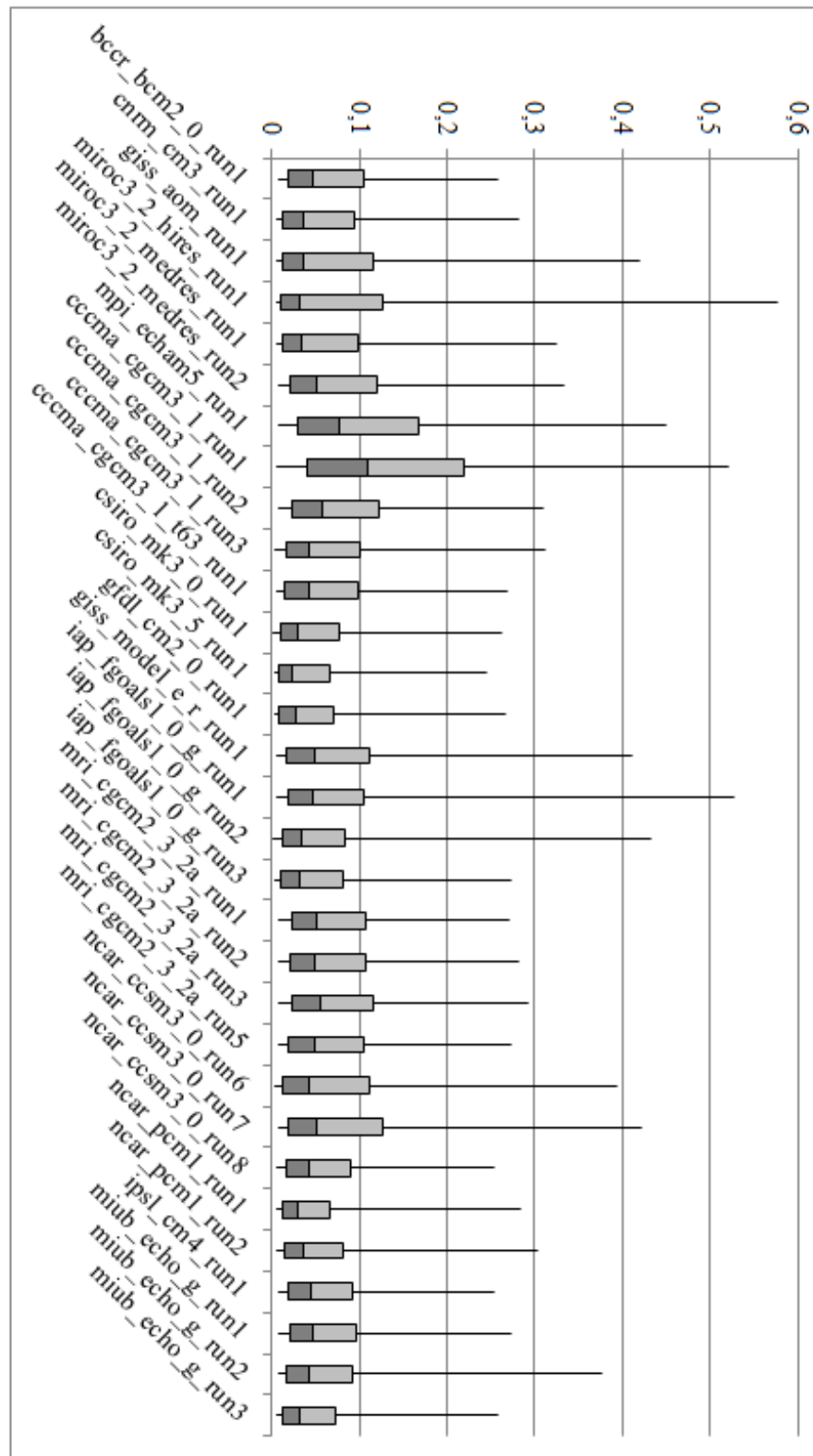


Figura 6.5: Diagramas de caja para los modelos climáticos del escenario B1

Tabla 6.7: Periodos de sequía para los modelos del escenario B1

Modelo	# de Periodos	Qmax	Q75	Q90	Qmedio
bccr_bcm2_0_run1	86	4,75	1,15	2,45	0,89
cnrm_cm3_run1	177	7,50	0,96	2,52	0,92
giss_aom_run1	163	6,29	1,08	2,74	0,98
miroc3_2_hires_run1	207	8,17	0,88	2,51	0,90
miroc3_2_medres_run1	197	9,79	0,92	2,34	0,85
miroc3_2_medres_run2	85	6,33	1,00	2,24	0,77
mpi_echam5_run1	29	3,17	2,02	2,88	1,07
cccma_cgcm3_1_run1	13	8,63	2,31	6,36	1,49
cccma_cgcm3_1_run2	51	3,71	1,46	2,38	0,96
cccma_cgcm3_1_run3	114	10,88	1,00	2,56	0,88
cccma_cgcm3_1_t63_run1	118	6,33	1,13	2,62	0,98
csiro_mk3_0_run1	161	20,75	0,96	3,82	1,27
csiro_mk3_5_run1	176	19,29	1,00	3,62	1,38
gfdl_cm2_0_run1	171	17,00	0,96	3,68	1,29
giss_model_e_r_run1	120	5,33	1,10	2,45	0,84
iap_fgoals1_0_g_run1	97	5,33	1,31	2,34	0,90
iap_fgoals1_0_g_run2	145	19,92	1,23	2,48	0,99
iap_fgoals1_0_g_run3	116	11,33	1,78	4,71	1,55
mri_cgcm2_3_2a_run1	70	3,71	1,27	2,36	0,83
mri_cgcm2_3_2a_run2	84	3,92	1,24	2,04	0,76
mri_cgcm2_3_2a_run3	56	5,13	1,39	2,36	0,88
mri_cgcm2_3_2a_run5	86	4,13	1,40	2,46	0,88
ncar_ccsm3_0_run6	112	10,83	1,49	3,33	1,25
ncar_ccsm3_0_run7	104	4,00	1,15	2,54	0,84
ncar_ccsm3_0_run8	128	5,33	0,96	2,33	0,79
ncar_pcm1_run1	202	8,71	1,01	2,56	0,92
ncar_pcm1_run2	161	5,38	1,15	2,64	0,94
ipsl_cm4_run1	95	4,79	1,21	2,38	0,86
miub_echo_g_run1	91	4,17	1,25	2,29	0,82
miub_echo_g_run2	101	5,08	1,04	2,41	0,83
miub_echo_g_run3	184	9,71	1,29	2,65	1,00



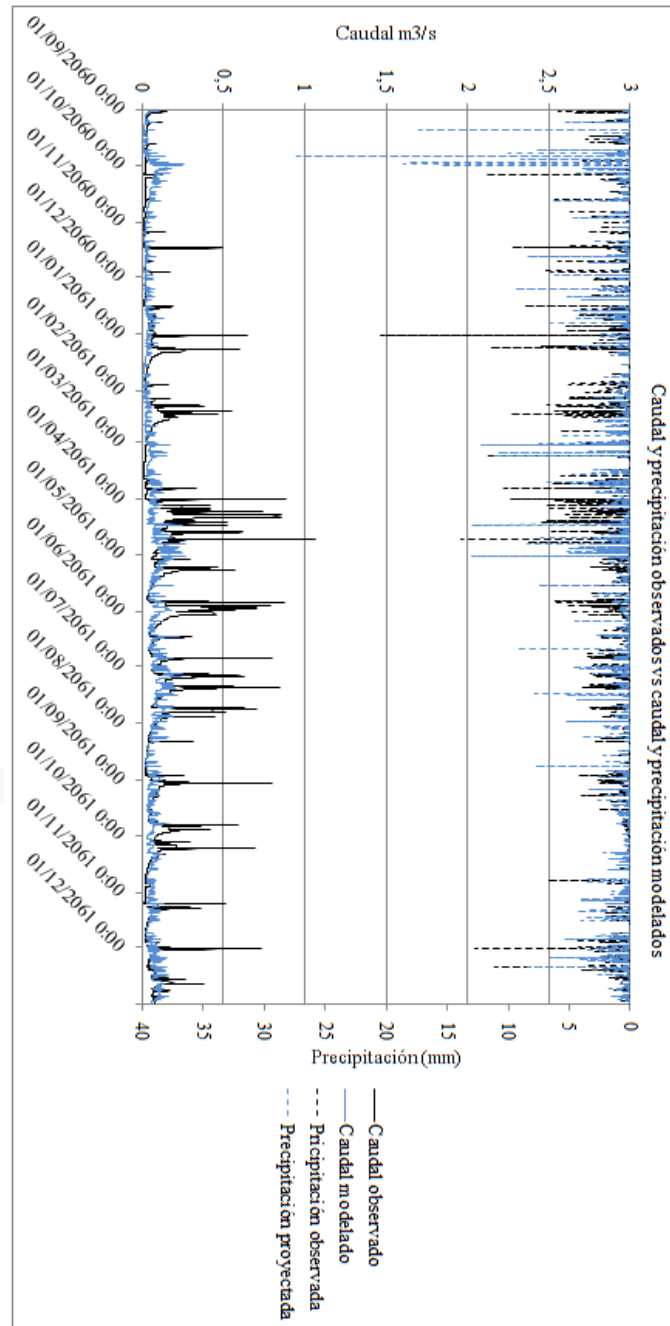


Figura 6.6: Caudal y precipitación actual vs caudal y precipitación del modelo

---

## Bibliografía

---

- [1] Pascal Podwojewski. Los suelos de las altas tierras andinas: los páramos del ecuador. *Bol Soc Ecuador Cie Suelo*, 18(9):14, 1999.
- [2] C Josse, Francisco Cuesta, Gonzalo Navarro, V Barrena, E Cabrera, E Chacón-Moreno, W Ferreira, M Peralvo, J Saito, and A Tovar. Ecosistemas de los andes del norte y centro. bolivia, colombia, ecuador, Perú y venezuela. *Secretaría General de la Comunidad Andina, Lima*, 2009.
- [3] Karla Beltrán. *Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador*. EcoCiencia, 2009.
- [4] Patricio Mena Vásquez and Robert Hofstede. Los páramos ecuatorianos. *Botánica económica de los Andes Centrales. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz*, 2006.
- [5] Inga Hedberg and Olov Hedberg. Tropical-alpine life-forms of vascular plants. *Oikos*, pages 297–307, 1979.
- [6] Wouter Buytaert. *The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology*. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2004.
- [7] James L Luteyn and Henrik Balslev. *Páramo: an Andean ecosystem under human influence*. Academic Press London (UK), 1992.
- [8] W Buytaert, R Céleri, B De Bièvre, and F Cisneros. Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Descargado de ftp://ftp.ciat.cgiar.org/.../HIDROLOGIA\_DEL\_PARAMO en octubre*, 2010.
- [9] Luis Daniel Llambí, Soto Werschitz, Irma Alejandra, Rolando Céleri, Bert De Bievre, Boris Ochoa, and Pablo Borja. Ecología, hidrología y suelos del páramo. 2012.



- [10] Wilhelm Kehrler and G Kaaden. Notes on the geology of ecuador with special reference-to the western cordillera. 1980.
- [11] Martin L Parry. *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC*, volume 4. Cambridge University Press, 2007.
- [12] Bryson Bates, Zbigniew W Kundzewicz, Shaohong Wu, and Jean Palutikof. *Climate change and water: Technical paper vi*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008.
- [13] TF Stocker, D Qin, GK Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, et al. Ipcc, 2013: summary for policymakers in climate change 2013: the physical science basis, contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2013.
- [14] Edson Ramírez. Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de la paz y el alto, bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, 2:49, 2008.
- [15] Bernard Francou, Mathias Vuille, Patrick Wagnon, Javier Mendoza, and Jean-Emmanuel Sicart. Tropical climate change recorded by a glacier in the central andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, bolivia, 16 s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D5), 2003.
- [16] Diego Mora, Lenin Campoazano, Felipe Cisneros, Guido Wyseure, and Patrick Willems. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the paute basin, ecuadorean andes. *Mountain Research and Development*, 2014.
- [17] Bart Nijssen, Greg M O'Donnell, Alan F Hamlet, and Dennis P Lettenmaier. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic change*, 50(1-2):143–175, 2001.
- [18] Yukiko Hirabayashi, Shinjiro Kanae, Seita Emori, Taikan Oki, and Masahide Kimoto. Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4):754–772, 2008.
- [19] Juan Dumas. Necesidades de adaptación y mitigación para enfrentar el cambio climático en ecuador. *Revista ambiente y desarrollo*, 2:48–49, 2007.

- [20] Luis Cáceres, Raúl Mejía, and Gonzalo Ontaneda. Evidencias del cambio climático en ecuador. *Bulletin Français des Etudes Andines*, 27:547–556, 1998.
- [21] Luis Cáceres and Ana Núñez. Segunda comunicació nacional sobre cambio climático. Technical report, Ministerio del ambiente, 2011.
- [22] Enrique Palacios Chacón and Sheila Serrano Vincenti. Validación de los modelos de cambio climático hidrostáticos y no hidrostáticos sobre la climatología de ecuador en las variables de precipitación y temperaturas extremas. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 13(1), 2011.
- [23] Carlos E Ludeña and David Wilk. Ecuador: Mitigación y adaptación al cambio climático. Technical report, Inter-American Development Bank, 2013.
- [24] Juan José Nieto, Rodney Martínez, J Regalado, and F Hernández. Análisis de tendencia de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio climático en la costa del ecuador. *Acta oceanográfica del Pacífico*, 11(1):17–21, 2002.
- [25] AC Conde Álvarez and C Gay García. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. 2008.
- [26] IPCC. *Informe especial del IPCC: Escenarios de emisiones*. Grupo Internacional de expertos sobre el Cambio Climático, 2000.
- [27] Víctor Magaña, Cecilia Conde, O Sánchez, and Carlos Gay. Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para méxico. *Gay, C.(comp.), México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, pages 15–21, 2000.
- [28] Wouter Buytaert, Rolando Céleri, and Luis Timbe. Predicting climate change impacts on water resources in the tropical andes: Effects of gcm uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 36(7), 2009.
- [29] Rocío Urrutia and Mathias Vuille. Climate change projections for the tropical andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2), 2009.

- [30] Danny Harvey, Jonathan Gregory, Martin Hoffert, Atul Jain, M Lal, R Lee-mans, S Raper, T Wigley, and J De Wolde. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del ipcc, 1997.
- [31] P Fattorelli, S Fernández. *Diseño Hidrológico*. Neerlandés-Zaragoza: WASA-GN, 2011.
- [32] Eliana Jorquera, Juan F Weber, and Santiago M Reyna. Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos, Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina*, pages 1–18, 2012.
- [33] Alex Furman. Modeling coupled surface–subsurface flow processes: a review. *Vadose Zone Journal*, 7(2):741–756, 2008.
- [34] Meron Teferi Taye, Victor Ntegeka, NP Ogiramoi, and Patrick Willems. Assessment of climate change impact on hydrological extremes in two source regions of the nile river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1):209–222, 2011.
- [35] P Willems. Vhm approach: transparent, step-wise and data mining based identification and calibration of parsimonious lumped conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 2011.
- [36] Rolando Céleri, Patrick Willems, and Jan Feyen. Evaluation of a data-based hydrological model for simulating the runoff of medium sized andean basins. *Maskana*, 1(1), 2015.
- [37] A Quichimbo, RF Vázquez, Esteban Patricio Samaniego Alvarado, et al. Aplicabilidad de los modelos nam y dbm para estimar caudales en subcuencas alto andinas de ecuador. 2013.
- [38] Raúl Fernando Vázquez Zambrano. Modelación hidrológica de una micro-cuenca altoandina ubicada en el austro ecuatoriano. *Maskana*, 1(1), 2015.
- [39] Wouter Buytaert, Francisco Cuesta-Camacho, and Conrado Tobón. Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1):19–33, 2011.

- [40] Juan Benavides-Solorio and Lee H MacDonald. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, colorado front range. *Hydrological Processes*, 15(15):2931–2952, 2001.
- [41] Diego MORA SERRANO. Impacts of climate change on catchment runoff for the paute river basin in the southern ecuadorian andes. 2013.
- [42] P Willems. Wetspro: Water engineering time series programming tool, methodology and user’s manual.[2.0]. *Leuven, Katholieke Universiteit Leuven*, 2003.
- [43] Patrick Willems, Diego Mora, Thomas Vansteenkiste, Meron Teferi Taye, and Niels Van Steenberghe. Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes—part 2: Intercomparison of models and calibration approaches. *Journal of Hydrology*, 510:591–609, 2014.
- [44] Michael H Kutner, Christopher J Nachtsheim, John Neter, William Li, et al. Applied linear statistical models. 2005.
- [45] Hoshin V Gupta, Harald Kling, Koray K Yilmaz, and Guillermo F Martinez. Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1):80–91, 2009.
- [46] J Eamonn Nash and Jonh V Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models part iâa discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3):282–290, 1970.
- [47] Alberto Luceño Vázquez and Francisco Javier González Ortiz. *Métodos estadísticos para medir, describir y controlar la variabilidad*, volume 1. Ed. Universidad de Cantabria, 2005.
- [48] Domingo Baeza Sanz, Diego García del Jalón, Barbara Gutiérrez Teira, and Pilar Vizcaíno Martínez. Basin influence on natural variability of rivers in semi-arid environments. *International journal of river basin management*, 3(4):247–259, 2005.
- [49] Ven T Chow, David R Maidment, and Larry W Mays. *Applied hydrology*. 1988.